



André Miguel Rodrigues Baptista

Licenciado em Engenharia Civil

Verificação de Segurança de Perfis de Aço Enformado a Frio com Secção em C

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de
Almeida, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade
Nova de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco

Vogais: Prof. Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves

Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2014

Dimensionamento de Secções de Aço Enformadas a Frio © André Miguel Rodrigues Baptista, FCT-UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais,

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio, carinho e amizade de todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram ao longo destes meses, para a execução da mesma. Assim, não posso deixar de agradecer a todos.

- A Deus por ter estado sempre comigo, dando-me saúde, bem-estar e condições financeiras para completar esta etapa.

- Aos meus pais pelo amor e carinho que têm demonstrado e por todo o suporte que me têm dado em qualquer circunstância.

- Ao Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida pela orientação, auxílio, simpatia e disponibilidade que demonstrou ao longo deste trabalho.

- Aos meus irmãos pelo apoio e carinho, em especial ao Pedro Baptista, que me tem acompanhado de perto no meu percurso académico, pela disponibilidade para me ajudar que sempre demonstrou.

- A toda a minha família por estar sempre presente.

- À minha namorada por toda a compreensão, auxílio, paciência e disponibilidade para me ajudar no que for preciso e por ser quem é.

- Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, nos bons e nos maus momentos.

Resumo

Este trabalho incide sobre a análise e dimensionamento de secções de aço enformadas a frio de acordo com o Eurocódigo 3, nomeadamente as Partes 1-1, 1-3 e 1-5 desse documento. Inicialmente é feita uma descrição geral do desenvolvimento do aço enformado a frio desde o seu aparecimento, referindo aspectos relativos ao seu processo de fabrico e realçando as vantagens deste produto na construção. Tendo em conta que a estabilidade deste tipo de elementos é afetada pela sua elevada esbelteza, são analisados os tipos de instabilidade mais comuns em elementos de aço e em particular os fenómenos de encurvadura mais significativos em elementos enformados a frio, apresentando-se as características principais dos mesmos.

De seguida analisam-se as metodologias que o Eurocódigo 3, principalmente a sua Parte 1-3, fornece de modo a se proceder a um correcto dimensionamento de um perfil enformado a frio com uma secção transversal genérica, dando especial importância ao cálculo das larguras e espessuras efetivas dos elementos, que estão relacionadas com os modos de instabilidade local e distorcional, respetivamente. Procede-se depois à caracterização das várias regras de verificação de segurança que devem ser asseguradas de modo a garantir, quer a resistência das secções aos esforços quer a resistência das peças à encurvadura.

Finalmente, efectua-se um estudo numérico recorrendo ao Matlab, definindo todos os passos necessários a um correto dimensionamento de perfis enformados a frio, e analisando correspondente conjunto de resultados. Neste estudo, onde se variam as dimensões da secção transversal e os esforços atuantes, procura-se obter, para cada situação considerada, a secção que verifica todas as condições de segurança.

Palavras-chave: elementos enformados a frio, encurvadura, instabilidade local, instabilidade distorcional, Eurocódigo 3, verificação de segurança, largura efetiva, espessura efetiva.

Abstract

This work deals with the analysis and design of cold formed steel sections according to Eurocode 3, namely Parts 1-1, 1-3 and 1-5. Initially, it is given a general description to the development of cold formed steel since its appearance, referring its manufacturing process and outlining the advantages of this product in construction. As the stability of such elements is affected by their high slenderness, the types of instability most common in steel structures are addressed, particularly the buckling phenomena most relevant for cold formed members.

Subsequently, the methodologies prescribed in Eurocode 3, mainly in Part 1-3, for the correct design of a cold formed steel member with a generic cross section, are presented, giving special importance to local and distortional buckling. It is then possible to characterize the safety rules that ensure resistance of sections and against buckling.

Finally, the design of cold formed structural steel members is carried out, based on a numerical study using Matlab and on the analysis of the corresponding set of results. In this study, the dimensions of the cross section and the loading conditions are variable, aiming to obtain, for each situation considered, the section which satisfies all safety requirements.

Keywords: cold formed elements, buckling, local buckling, distortional buckling, Eurocode 3, safety checking, effective width, effective thickness.

Índice de Matérias

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice de Matérias.....	vii
Índice de tabelas.....	ix
Índice de figuras.....	xi
Simbologia.....	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Evolução histórica do aço enformado a frio	2
1.3. Processos de fabrico.....	3
1.4. Vantagens e desvantagens do aço enformado a frio	4
1.5. Elementos estruturais	6
1.6. Materiais	7
1.7. Estrutura e objetivos da dissertação	8
2. Conceitos teóricos.....	9
2.1. Estabilidade estrutural.....	9
2.1.1. Tipos de instabilidade estrutural	10
2.1.1.1. Instabilidade bifurcacional.....	10
2.1.1.2. Instabilidade por ponto limite ou por “snap-through”	15
2.1.2. Estabilidade de barras com secção de parede fina aberta	16
2.1.2.1. Fenómenos de instabilidade global.....	16
2.1.2.2. Fenómenos de instabilidade local	16
2.1.3. Tipos de análise de estabilidade.....	18
2.1.3.1. Análise linear de estabilidade	19
2.1.3.2. Análise não linear de estabilidade.....	19
2.2. Características gerais de elementos enformados a frio	20
2.3. Método da largura efetiva (MLE).....	22
3. Dimensionamento segundo o Eurocódigo 3	25
3.1. Propriedades das secções	25
3.1.1. Eixos convencionais das secções	25
3.1.2. Geometria e dimensões das secções	26
3.1.3. Propriedades do material e das secções	28

3.1.4. Secção transversal bruta.....	30
3.1.5. Cálculo das propriedades segundo o anexo C da EN 1993-1-3	32
3.2. Classificação das secções transversais	37
3.3. Encurvadura local	41
3.4. Encurvadura distorcional	46
3.5. Verificações de segurança.....	52
3.5.1. Resistência de secções	52
3.5.1.1. Esforço axial de tração.....	52
3.5.1.2. Esforço axial de compressão.....	53
3.5.1.3. Momento fletor /flexão simples	53
3.5.1.4. Esforço transverso.....	56
3.5.1.5. Forças concentradas.....	58
3.5.1.6. Flexão desviada.....	63
3.5.1.7. Flexão desviada composta com tração.....	63
3.5.1.8. Flexão desviada composta com compressão.....	63
3.5.1.9. Flexão desviada composta e esforço transversal	64
3.5.1.10. Flexão desviada composta e força concentrada	65
3.5.2. Resistência à encurvadura.....	65
3.5.2.1. Esforço axial de compressão.....	65
3.5.2.2. Flexão simples	74
3.5.2.3. Flexão desviada composta com compressão.....	77
3.5.2.4. Flexão desviada composta com tração.....	79
4. Análise dos resultados obtidos.....	81
4.1. Variação da altura da secção transversal	82
4.2. Variação da espessura dos elementos	96
4.3. Variação do esforço de compressão.....	108
4.4. Variação do esforço transversal.....	110
4.5. Variação da força concentrada.....	113
4.6. Variação do momento fletor segundo y	116
4.7. Variação do momento fletor segundo z	118
5. Conclusões	121
6. Bibliografia	123

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Limites relativos à relação largura – espessura de elementos de aço enformado a frio [1].	27
Tabela 3.2 – Limites máximos das relações largura-espessura para elementos internos comprimidos	39
Tabela 3.3 – Limites máximos das relações largura-espessura para elementos externos comprimidos	40
Tabela 3.4 – Valores dos coeficientes de encurvadura para elementos comprimidos internos	44
Tabela 3.5 – Valores dos coeficientes de encurvadura para elementos comprimidos externos	44
Tabela 3.6 – Elementos comprimidos externos	45
Tabela 3.7 – Diferentes modelos com sistemas de mola	47
Tabela 3.8 – Tensão resistente ao esforço transversal em função da esbelteza	57
Tabela 3.9 – Secções transversais com uma única alma – uma única carga ou reação de apoio	60
Tabela 3.10 – Secções transversais com uma única alma – Duas cargas opostas com afastamento inferior a $1,5 h_w$	61
Tabela 3.11 – Coeficientes de rigidez efetiva para vigas, k_{ij} .	68
Tabela 3.12 – Definição da curva de encurvadura de acordo com o tipo de secção transversal	73
Tabela 3.13 – Fator de encurvadura correspondente à respetiva curva de encurvadura	73
Tabela 3.14 – Fatores de correção k_c [3].	76
Tabela 3.16 – Coeficientes de momento uniforme equivalente	79
Tabela 4.1 – Tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} , em função da altura da secção, h .	84
Tabela 4.2 – Relação esforço transversal atuante (V_{Ed}) com esforço transversal resistente da alma (V_{wRd}).	90
Tabela 4.3 – Variação da tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} , com a espessura dos elementos.	98
Tabela 4.4 – Variação do rácio de resistência à flexão composta com compressão e esforço transversal em função da variação do esforço transversal.	113

Índice de figuras

Figura 1.1 – Máquina de laminagem a frio.....	4
Figura 1.2 – Secções de perfis de aço enformado a frio	6
Figura 1.3 – Painéis de chapa de aço enformados a frio	7
Figura 2.1 - Ilustração exemplificativa do conceito de estabilidade do equilíbrio	9
Figura 2.2 – Instabilidade Bifurcacional [5].	10
Figura 2.3 – Geometria da coluna de Euler sujeita a um carregamento de compressão axial e respectivas trajectórias de equilíbrio	11
Figura 2.4 – Coluna tubular metálica sujeita a carga axial P	12
Figura 2.5 – Placa quadrada sujeita a compressão axial e respectivas trajectórias de equilíbrio 13	
Figura 2.6 – Comparação entre as trajectórias de pós-encurvadura da placa com a da coluna.	14
Figura 2.7 – Representação esquemática de um problema de instabilidade por ponto limite ...	15
Figura 2.8 – Diferentes modos de intabilidade de uma barra sujeita à compressão.....	17
Figura 2.9 – Secção em C com reforços nas extremidades.	22
Figura 2.10 – Largura efetiva	23
Figura 3.1 – Convenção dos eixos ortogonais de uma secção transversal em C	25
Figura 3.2 – Tipos de secções transversais.....	26
Figura 3.3 – Secção transversal bruta com as dimensões medidas até à linha média do material.....	30
Figura 3.4 – Secção transversal bruta com as dimensões medidas até ao ponto médio das curvas.	30
Figura 3.5 – Secção transversal em C dividida em várias partes definidas por nós	32
Figura 3.7 – Sequência de passos para determinação da secção efetiva, largura e espessura, para a instabilidade distorcional	50
Figura 3.8 – Distância das fibras extremas ao centro de gravidade e distribuição de tensões..	55
Figura 3.9 – Alma reforçada longitudinalmente	58
Figura 3.10 – Exemplos de secções transversais com uma única alma	59
Figura 3.11 – Deformadas de barras sujeitas à compressão, com diferentes condições de apoio	67
Figura 3.12 – Fatores de distribuição para colunas com continuidade.....	68
Figura 3.13 – Ábaco para cálculo do comprimento de encurvadura - modo sem deslocamentos laterais	69
Figura 3.14 – Ábaco para cálculo do comprimento de encurvadura - modo com deslocamentos laterais.	69
Figura 4.1 – Segurança ao esforço axial de compressão (N_c) e de tração (N_t).....	83
Figura 4.2 - Segurança ao esforço transversal (V_t) e às forças concentradas (F_c).	83
Figura 4.3 – Segurança à flexão simples para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z	85
Figura 4.4 – Segurança à flexão desviada para momento fletor positivo ou negativo segundo y ou z.	85
Figura 4.5 – Segurança à flexão desviada composta com tração.	87
Figura 4.6 – Segurança à flexão desviada composta com compressão	87
Figura 4.7 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal.....	88
Figura 4.8 – Segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal	89
Figura 4.9 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas	90

Figura 4.12 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os índices terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3).....	93
Figura 4.13 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.	93
Figura 4.14 – Segurança à flexão desviada composta com tração.	95
Figura 4.15 – Segurança ao esforço axial de compressão (N_c) e de tração (N_t).....	97
Figura 4.16 – Segurança ao esforço transversal (V_t) e às forças concentradas (F_c)	97
Figura 4.17 – Segurança à flexão simples para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z.....	99
Figura 4.18 – Segurança à flexão desviada para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z.	99
Figura 4.19 – Segurança à flexão desviada composta com tração.	100
Figura 4.20 – Segurança à flexão desviada composta com compressão.	100
Figura 4.21 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal.....	101
Figura 4.22 – Verificação de segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal.....	102
Figura 4.23 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas.	103
Figura 4.24 – Segurança à compressão (N_{yb} corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em y; N_{zb} corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em z; o valor de N_{Tb} corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por torção/torção-flexão em y).	104
Figura 4.25 – Segurança à flexão simples.....	104
Figura 4.26 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3).....	105
Figura 4.27 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.	106
Figura 4.28 - Segurança à flexão desviada composta com tração.....	107
Figura 4.30 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.	109
Figura 4.31 – Segurança ao esforço transversal e às forças concentradas, para esforço transversal variável.	111
Figura 4.32 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal, para esforço transversal variável.	112
Figura 4.33 – Segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal, para esforço transversal variável.	112
Figura 4.34 – Segurança a forças concentradas, para força concentrada variável.	114
Figura 4.35 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas, para força concentrada variável.	115
Figura 4.37 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3, para variação do momento fletor em torno de y.	117
Figura 4.38 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3), para variação do momento fletor em torno de z.....	119
Figura 4.39 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3, para variação do momento fletor em torno de z.	119

Símbolos

Letras latinas

A_g – Área bruta da secção transversal

$A_{g,sh}$ – Área bruta para uma secção considerando os cantos curvos

A – Área da secção transversal

A_{eff} – Área efetiva

b – Largura do banzo

b_{eff} – Largura efetiva

b_i – Largura do banzo, medido pelo exterior

b_p – Largura do banzo medido até ao ponto médio das curvas

c_i – Largura do reforço primário, medido pelo exterior

C_θ – Rigidez da mola rotacional

C_1, C_2, C_3 – Fatores dependentes das condições dos apoios e da forma do diagrama dos momentos fletores

C_m – Coeficientes de momento uniforme equivalente

d_{Ai} – Área de uma parte da secção transversal

d_i – Largura do reforço secundário, medido pelo exterior

E – Módulo de elasticidade do material

e_N – Excentricidade entre os centros de gravidade das secções efetiva e bruta

f_{yb} – Tensão nominal de cedência

f_{ya} – Tensão de cedência média

f_u – Tensão nominal última

f_{bv} – Tensão resistente ao esforço transversal

F_c – Valor de verificação de segurança às forças concentradas

F_{Ed} – Força concentrada atuante

G – Módulo de distorção

h_i – Altura da secção, medida pelo exterior
 h_s – Distância entre o centro de gravidade do banzo superior e a base da secção transversal
 I – Momento principal de inércia
 I_g – Momento de inércia da secção transversal
 $I_{g,sh}$ – Momento de inércia para uma secção com cantos curvos
 I_w – Constante de empenamento de uma secção transversal
 $I_{w,sh}$ – Constante de empenamento para uma secção com cantos curvos
 I_{y0} – Momento de inércia da secção em torno de y_0
 I_y – Inércia aproximada da secção em torno de y
 I_{z0} – Momento de inércia da secção em torno de z_0
 I_z – Inércia aproximada da secção em torno de z
 I_{yz0} – Momento de inércia da secção em torno de yz_0
 I_{yz} – Inércia aproximada da secção em torno de yz
 I_ξ – Eixo principal de inércia
 I_η – Eixo principal de inércia
 $I_{y00}, I_{y0}, I_{z00}, I_{z0}, I_{0000}, I_{000}$ – Constantes setoriais
 I_w – Constante de empenamento
 I_t – Inércia de torção
 I_p – Momento polar de inércia relativamente ao centro de corte
 I_u, I_v – Momento de inércia efetivo em torno dos eixos principais de inércia u e v
 i – Raio de giração
 i_0 – Raio de giração polar da secção
 k – Coeficiente numérico que depende do tipo de enformagem
 k_σ – Coeficiente de encurvadura do elemento
 k_f – Relação entre as áreas efetivas dos banzos
 K – Rigidez da mola
 k_c – Coeficiente de rigidez de flexão da coluna central
 k_i – Coeficiente de rigidez de flexão das colunas adjacentes
 k_{ij} – Coeficiente de rigidez efetiva de flexão das vigas adjacentes

k_z, k_w – Fatores de comprimento efetivo

k_c – Fator de correção que tem em conta a distribuição de momentos

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ – Fatores de interação

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}, k_{11}$ – Constantes intervenientes no cálculo da força concentrada resistente

l – Comprimento da coluna

L_{cr} – Comprimento de encurvadura

L_w – Comprimento de encurvadura da barra à encurvadura por torção

$M_{c,Rd}$ – Momento fletor resistente da secção

M_{Ed} – Momento fletor atuante

$M_{f,Rd}$ – Momento plástico resistente de uma secção composta pelos banzos

$M_{pl,Rd}$ – Momento plástico resistente da secção

M_{cr} – Momento crítico elástico de encurvadura lateral/torção

$M_{b,Rbd}$ – Momento fletor resistente da barra à encurvadura

n – Número de dobras de 90° da secção transversal

$N_{t,Rd}$ – Esforço axial de tração resistente da secção

N_{Ed} – Esforço axial atuante

$N_{c,Rd}$ – Esforço axial de compressão resistente da secção

$N_{cr,T}$ – Carga crítica elástica de encurvadura por torção

$N_{cr,TF}$ – Carga crítica elástica de encurvadura por torção/flexão

$N_{cr,y}$ – Carga crítica elástica de flexão em torno do eixo y

$N_{b,Rbd}$ – Esforço axial resistente da barra à encurvadura

P_E – Carga crítica de Euler

r_i – Raio interior de dobragem da secção

$R_{w,Rd}$ – Força concentrada resistente

S_{y0} – Momento estático da secção em torno de y_0

S_{z0} – Momento estático da secção em torno de z_0

s_d – Comprimento total da linha média da alma

s_p – Comprimento do maior elemento plano da alma
 s_w – Comprimento da alma entre os pontos centrais dos cantos da secção
 s_s – Largura real do apoio
 t_{eff} – Espessura efetiva
 t_{cor} – Espessura nuclear da chapa
 t_{nom} – Espessura nominal da chapa
 $t_{rev\ met}$ – Espessura do revestimento metálico
 u – Eixo de maior inércia da secção
 $u_{min}, u_{max}, v_{min}, v_{max}$ – Coordenadas das fibras extremas
 u – Carga unitária aplicada
 v – Eixo de menor inércia da secção
 $V_{b,Rd}$ – Esforço transversal resistente da secção
 V_{Ed} – Esforço transversal atuante
 x – Eixo longitudinal do elemento
 $w(x)$ – Equação do modo de instabilidade da coluna de Euler
 $w(x,y)$ – Equação do modo de instabilidade de uma placa
 W_{ω} – Módulo de empenamento
 W_{eff} – Módulo de flexão efetivo
 W_{el} – Módulo de flexão elástico
 W_{pl} – Módulo de flexão plástico
 $W_{u,v}, W_{v,u}$ – Módulo de flexão segundo os eixos principais de inércia
 y – Eixo horizontal do elemento
 y_{cg} – Centro de gravidade em y
 y_{cc} – Centro de corte em y
 y_s – Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em y
 z – Eixo vertical do elemento
 z_{cg} – Centro de gravidade em z
 z_{cc} – Centro de corte em z

z_s – Distância entre o centro de corte e o centro de gravidade em z

z_j, y_j – Fatores não simétricosp – Coeficiente de redução

z_a – Coordenada do ponto de aplicação da carga

z_s – Coordenada do centro de corte

Letras gregas

σ_{cr} – Tensão crítica

ν – Coeficiente de Poisson do material

$\sigma_{max,e}$ – Tensão máxima na fibra

ϕ_i – Ângulo formado entre elementos da secção

γ_{M0} – Coeficiente de segurança relativo à encurvadura local e distorcional

γ_{M1} – Coeficiente de segurança relativo à encurvadura global

γ_{M2} – Coeficiente de segurança relativo à resistência das ligações

δ – Fator que tem em conta os cantos arredondados da secção

$\omega_0, \omega_{0i}, \omega_i$ – Coordenadas setoriais

ω_{mean} – Coordenada setorial média

ω_{sj} – Coordenada setorial relativamente ao centro de corte

ω_{max} – Coordenada setorial máxima

$\bar{\lambda}_p, \bar{\lambda}_d$ - Esbelteza relativa

Ψ – Rácio das tensões

$\bar{\lambda}_{p,red}$ – Esbelteza relativa reduzida

δ – Deslocamento do reforço devido à carga

$\sigma_{comp,Ed}$ – Tensão de compressão máxima na linha média do elemento

χ_d – Coeficiente de redução para a instabilidade distorcional

$\sigma_{cr,s}$ – Tensão elástica crítica

$\bar{\lambda}_w$ - Esbelteza relativa da alma

ΔM_{Ed} – Momento adicional devido à excentricidade eN

$\bar{\lambda}_i$ - Esbelteza normalizada

η_1, η_2 – Fatores de distribuição de rigidez nos nós

β – Constante de assimetria da secção em relação ao eixo y

$\bar{\lambda}_T$ - Esbelteza normalizada

χ – Coeficiente de redução

ϕ – Pâmetro adimensional

α – Fator de imperfeição

$\bar{\lambda}_{LT}$ - Esbelteza normalizada relativa ao modo de instabilidade lateral por flexão-torção

$\chi_{LT,mod}$ - Coeficiente de redução modificado

1. ntrodução

1.1. Enquadramento

A concepção de uma estrutura de um edifício é um processo complexo e por vezes moroso que, até estar concluído, tem que passar por diversas etapas. O principal aspeto que um engenheiro tem de verificar aquando do dimensionamento de uma estrutura é que esta cumpra todos os requisitos de segurança e verifique todas as condições necessárias para cumprir o tempo de vida útil previamente estipulado para a mesma, mantendo as suas características funcionais e estruturais. Hoje em dia, outro aspecto que condiciona grandemente a execução de uma estrutura é a vertente económica. Assim, o projetista deve procurar que a estrutura tenha o menor custo possível, verificando simultaneamente todos os requisitos exigidos a um dimensionamento seguro. Para que uma estrutura seja de baixo custo é necessário verificar determinadas condições e uma delas é que deve ser o mais leve possível, de modo a reduzir, quer a quantidade (e logo o custo) dos materiais, quer as cargas permanentes.

O aço enformado a frio, devido ao seu processo de fabrico, em que os elementos são dobrados a frio sendo necessário que a espessura das chapas seja reduzida, permite obter elementos bastante leves e com um rácio resistência-peso. As peças de aço enformado a frio podem ser produzidas economicamente, existindo grande versatilidade no seu fabrico. Utilizando este material, torna-se pois possível conceber edifícios leves e de baixo custo [8] [9] [10].

De modo a elevar ao máximo a eficiência de uma estrutura ou de um elemento da mesma, pode-se efetuar uma optimização, que consiste na determinação da solução que satisfaz as exigências de segurança e funcionalidade com um menor custo. Esta optimização é alcançada através de um processo iterativo onde intervêm vários parâmetros que são constantes e outros que são variáveis. Estes últimos vão sendo sucessivamente modificados até se obter uma solução que minimiza o peso da estrutura e, conseqüentemente, o custo (custo relacionado exclusivamente com a quantidade de material e não com o custo de fabrico e montagem). Para perfis de aço enformado a frio, podem considerar-se como parâmetros constantes as cargas que atuam sobre o elemento e como parâmetros variáveis, por exemplo, as dimensões do mesmo ou o peso próprio da barra [9].

1.2. Evolução histórica do aço enformado a frio

Ao longo da história da construção civil, tem-se observado uma importante evolução funcional e estrutural dos edifícios. Inicialmente as estruturas eram concebidas em pedra, terra ou madeira, enquanto atualmente a maioria das estruturas são em betão armado, madeira ou aço.

Falando especificamente da construção em aço, esta sofreu uma evolução notável ao longo dos últimos dois séculos. Atualmente, existem três tipos principais de elementos estruturais em aço: perfis laminados a quente, perfis de chapas soldadas e perfis de chapa fina enformados a frio.

A maior parte dos perfis utilizados na construção são obtidos pela laminação a quente ou pela soldadura de chapas. A laminação a quente consiste basicamente no aquecimento do material a grandes temperaturas que depois é “moldado” ao passar por um trem de laminagem cujos cilindros dão a forma pretendida ao material. Os perfis também podem ser obtidos através da soldadura de várias chapas nas zonas de ligação entre estes (por exemplo, um perfil com secção em T, constituído por dois elementos, banzo e alma, pode ser obtido ligando por cordões de soldadura as chapas que constituem cada um desses elementos).

A enformagem a frio não é um processo tão utilizado quanto os outros dois referidos acima. No entanto, este método de obtenção de perfis metálicos é bastante eficiente e muito económico, permitindo obter perfis menos pesados e mais esbeltos, ou seja, com menor espessura dos elementos. A espessura das chapas utilizada nestes perfis varia geralmente entre 0,4 e 6,5 mm, possibilitando a sua dobragem por processos de quinagem ou laminagem a frio até se obter a forma pretendida do perfil [10].

As primeiras peças de aço enformado a frio remontam a 1850 nos EUA e na Grã-Bretanha. No entanto, a utilização deste tipo de elemento em edifícios surge apenas no início do século XX e de uma maneira bastante limitada, visto que à data este material era pouco aceite como material de construção. Outros aspetos que limitavam a sua utilização era o facto de não existir ainda uma metodologia estabelecida para a concepção e dimensionamento estrutural e a pré-fabricação ser bastante limitada. Contudo, constatou-se que o recurso ao aço permitia obter estruturas de forma bastante rápida e económica, pelo que se entendeu necessário desenvolver especificações relativas ao aço, nomeadamente ao aço enformado a frio. Assim, nas décadas de 40 e 50 do século passado, a AISI (American Iron and Steel Institute) desenvolveu um conjunto de especificações relativas ao dimensionamento de estruturas de aço enformado a frio, levando a

uma maior aceitação deste material na construção e a um substancial acréscimo de estruturas compostas por este tipo de elementos [10] [11] [12].

Actualmente, em países como os Estados Unidos da América, Canadá ou México, a utilização destes elementos de aço na construção é bastante comum e muito competitiva em termos económicos [10].

Na Europa, a documentação relativa ao dimensionamento de aço enformado a frio surgiu consideravelmente mais tarde do que na América. A partir de 1975 foi lançada, pela European Convention for Constructional Steelwork, documentação relativamente ao dimensionamento e fabricação de chapas de aço enformado a frio para a construção [13]. Mais recentemente, em 1989, surgiu o Eurocódigo 3, norma europeia de projeto que regulamenta o dimensionamento de elementos de aço, tanto laminados a quente como enformados a frio [13].

Em Portugal, a existência de construções que utilizem elementos de aço enformados a frio não é muito comum. Com efeito, as especificações relativas ao dimensionamento deste tipo de elementos são pouco divulgadas a nível académico e profissional. Acresce ainda que tem havido pouco investimento de fabricantes e armazenistas neste domínio. Assim, no nosso País, o mercado para construções com alguma importância que utilizem este material nos elementos principais da estrutura é muito escasso.

1.3. Processos de fabrico

Os elementos enformados a frio são obtidos através de, essencialmente, dois tipos de processo:

- Laminagem a frio (“Cold roll forming”);
- Quinagem (“Press brake”);

O método da **laminagem a frio** é bastante comum, estando já sistematizado e automatizado em fábrica, o que garante uma grande capacidade de produção. É o processo de fabrico mais utilizado e consiste na passagem de chapas de aço planas sobre vários pares de rolos que as comprimem e dobras, até que estas tenham a forma pretendida. O número de pares de rolos é tanto maior quanto mais complexa for a secção que se pretende obter [10] [14].

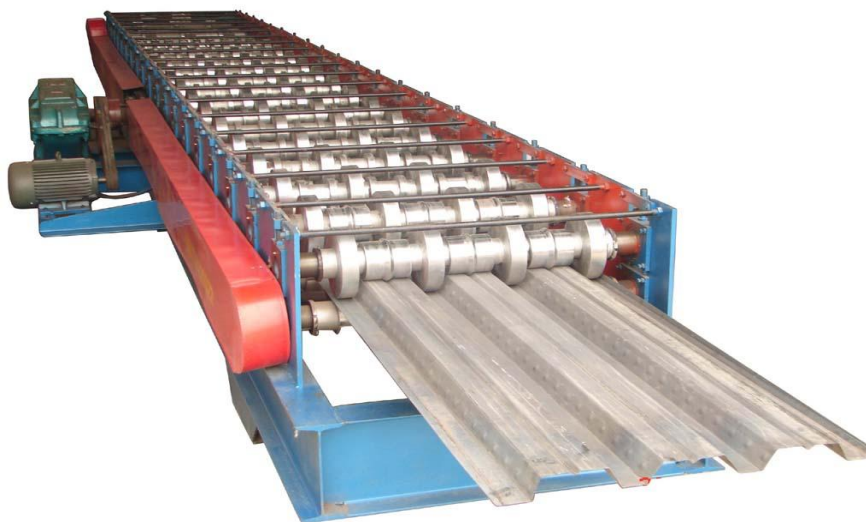


Figura 1.1 – Máquina de laminagem a frio (Cold Roll Forming Machine (LM-688)) [31].

A **quinagem** é um processo menos utilizado na fabricação deste tipo de elementos e aplica-se quando se pretende secções com uma configuração simples e quando o comprimento da chapa a “moldar” é limitado. Consiste basicamente na prensagem das chapas contra negativos que dão à chapa a forma pretendida. Para elementos mais complexos podem ser necessárias várias operações de prensagem até que estes tenham a forma desejada [10] [14].

O custo dos produtos depende muitas vezes do tipo de processo de fabrico utilizado na sua produção. Elementos que exijam um fabrico mais detalhado e complexo têm um custo naturalmente maior [10].

1.4. Vantagens e desvantagens do aço enformado a frio

Embora sejam ainda pouco utilizados na construção, os elementos enformados a frio apresentam importantes vantagens quando utilizados em edifícios, tais como [10] [12] [15] [16] [17] [18] [19]:

- Secções com formato complexo podem ser produzidas com facilidade, mantendo uma boa viabilidade económica e obtendo uma elevada relação resistência-peso;
- Comparados com os perfis laminados a quente, os enformados a frio podem ser fabricados para suportar cargas reduzidas com um custo de produção muito inferior;

- Podem ser produzidas secções encaixáveis, permitindo uma pré-disposição dos elementos compacta, aproveitando o espaço aquando do armazenamento e transporte e facilitando essas operações;
- A qualidade dos elementos encontra-se garantida devido à sistematização da fabricação;
- Possibilitam grande velocidade de montagem e permitem fácil manutenção e substituição;
- Estes elementos são recicláveis, podendo sempre ser reaproveitados.

Em comparação com outros materiais, como a madeira e o betão, o aço enformado a frio apresenta as seguintes vantagens:

- Maior leveza;
- Maior resistência e rigidez, apresentando um rácio resistência-peso bastante elevado devido ao processo de fabrico;
- Alta qualidade e homogeneidade dos elementos devido à sistematização da fabricação;
- Dispensa a utilização de cofragem;
- Não é combustível;
- É imune a problemas normalmente associados a estruturas em betão ou madeira (retração ou fluência no caso do betão e ataques de fungos/térmitas no caso da madeira).

As principais desvantagens deste material são:

- Apresenta problemas de encurvadura local, distorção e torção devido ao facto dos seus elementos terem pouca espessura;
- Os cálculos associados ao dimensionamento das secções são mais complexos que noutros tipos de elementos estruturais de aço;
- Baixa resistência ao fogo apresentando maiores reduções de resistência do que os perfis laminados a quente, devido à maior esbelteza dos elementos. As elevadas temperaturas levam à deterioração das propriedades mecânicas do material, o que faz com que os problemas de encurvadura se tornem ainda mais evidentes;
- Susceptível à corrosão, sendo necessário proceder à galvanização do aço, ou seja, revesti-lo, através da imersão na fase da fabricação, com um material que proporcione uma protecção de longa duração à corrosão. Esse material é, habitualmente, o zinco.

1.5. Elementos estruturais

Os elementos estruturais de aço enformado a frio podem ser classificados em dois tipos:

- Perfis;
- Painéis;

Os **perfis** ou elementos estruturais individuais têm como principal função suportar cargas, sendo a resistência estrutural e a rigidez as principais considerações a ter em conta no seu dimensionamento. Os perfis, que podem ter diferentes secções transversais, são compostos por elementos planos ligados entre si por pequenos elementos curvos [10] [1].

As secções podem assumir várias configurações geométricas, sendo as mais comuns as secções em C, Z, T, “hat”, “rack” e tubulares. Relativamente às dimensões, as secções podem ter uma altura que varia entre os 51 e os 305 mm e uma espessura entre 1,2 e 6,4 mm [10].

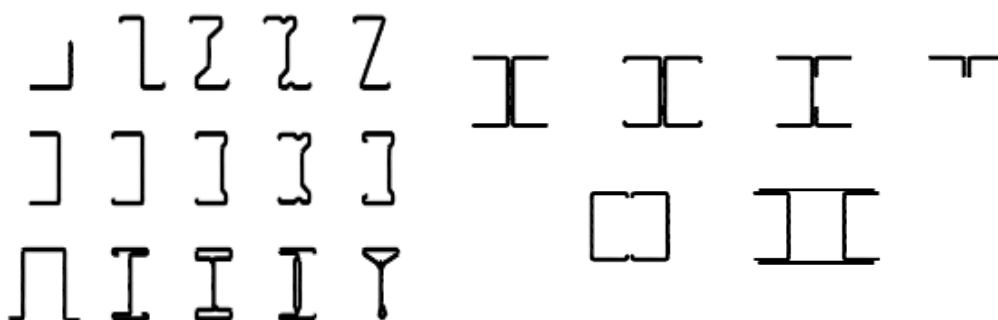


Figura 1.2 – Secções de perfis de aço enformado a frio [1].

Os **painéis** de chapa são habitualmente utilizados nas coberturas, nas lajes de piso (chapa colaborante), como painéis de parede, elementos de revestimento, etc. Estes elementos, além de oferecerem resistência estrutural, proporcionam também uma superfície que pode ser preenchida com betão [10].

Relativamente às dimensões, os painéis podem ter uma largura que varia entre os 38 e os 191 mm e uma espessura entre 0,5 e 1,9 mm [10].

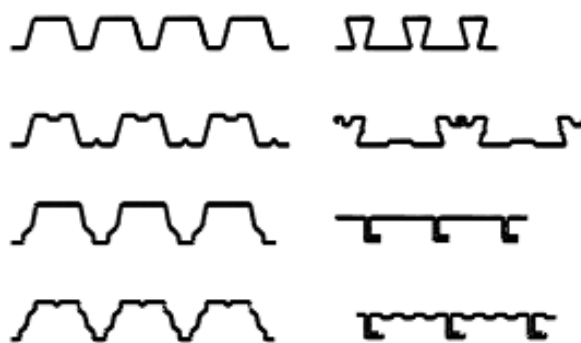


Figura 1.3 – Painés de chapa de aço enformados a frio [1].

1.6. Materiais

Segundo a EN1993-1-3, capítulo 3.1, alínea 1, todos os aços utilizados em perfis enformados a frio e em chapas perfiladas devem ser adequados à enformação a frio e à soldadura, caso seja necessário. Se os aços utilizados nos perfis e nas chapas forem galvanizados, devem também ser adequados à galvanização.

O aço mais comum usado em chapas perfiladas é o aço estrutural enformado a frio revestido a zinco aquecido, que assegura boa proteção contra fenómenos de corrosão. A sua tensão nominal de cedência varia entre os 220 e os 550 MPa, a tensão última entre os 300 e os 560 MPa e o módulo de elasticidade assume um valor próximo dos 210 GPa [7].

1.7. Estrutura e objetivos da dissertação

O objectivo desta dissertação consiste em apresentar, analisar e discutir os procedimentos necessários para um correto dimensionamento de secções enformadas a frio, recorrendo aos respectivos documentos que fornecem as regras de dimensionamento necessárias, nomeadamente o Eurocódigo 3, Partes 1-1, 1-3 e 1-5. Procura-se também compreender o comportamento deste tipo de elementos que, devido às suas características, são muito sensíveis a fenómenos de instabilidade de alguma complexidade. Pretende-se ainda avaliar a sensibilidade deste tipo de elementos a alterações introduzidas nas características da secção e nos níveis de carregamento.

Este trabalho é dividido, essencialmente, em três partes. A primeira parte aborda os conceitos necessários à percepção do comportamento estrutural de elementos enformados a frio, sendo analisados os fenómenos de instabilidade relacionados com este tipo de elementos que, por vezes, são de difícil compreensão. A segunda parte incide sobre o dimensionamento de secções enformadas a frio, englobando todos os aspectos que devem ser tidos em conta e que se encontram contemplados no Eurocódigo 3, bem como as regras relativas às verificações de segurança que devem ser satisfeitas. Por fim, na terceira parte são apresentadas e comentadas as análises efetuadas para diversas secções, onde se faz variar a geometria das mesmas, nomeadamente a altura da alma e a espessura dos elementos, e os níveis de carregamento.

2. Conceitos teóricos

2.1. Estabilidade estrutural

Quando um corpo é sujeito a ações exteriores pode deformar-se e/ou sofrer deslocamentos, ou seja, pode haver variações das posições relativas dos seus pontos. Essas variações definem a configuração de equilíbrio do corpo. É possível avaliar a estabilidade da configuração analisando o comportamento do corpo quando sujeito, por exemplo, a uma força exterior. Se, após deixar de se exercer a força sobre o corpo, este voltar à sua posição inicial, então existe estabilidade do equilíbrio; se não voltar à sua posição inicial, existe então instabilidade do equilíbrio [20] [5].

A estabilidade do equilíbrio pode ser facilmente explicada através da ilustração de uma esfera rígida sujeita à ação do seu peso próprio. Em repouso encontra-se: em equilíbrio estável sobre uma superfície côncava (a), em equilíbrio instável sobre uma superfície convexa (b) e em equilíbrio neutro sobre uma superfície horizontal (c) [5].

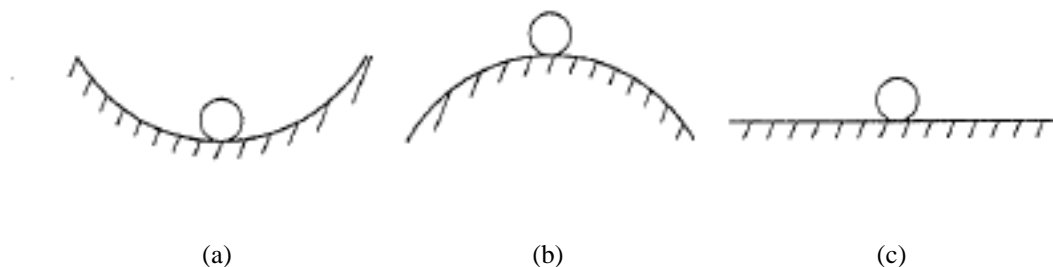


Figura 2.1 - Ilustração exemplificativa do conceito de estabilidade do equilíbrio [5].

Todas as estruturas devem ser dimensionadas de modo a verificarem a segurança em relação aos Estados Limites Últimos e aos Estados Limites de Utilização. Os fenómenos de instabilidade estrutural devem ser sempre considerados em projeto, pois podem provocar situações de colapso. Em estruturas metálicas, nomeadamente em elementos enformados a frio, os fenómenos de instabilidade são designados, habitualmente, por encurvadura, que é o efeito geometricamente não-linear provocado pela compressão. Efetivamente, em elementos formados por painéis de chapa fina de grande esbelteza, podem ocorrer problemas de encurvadura quando

os painéis são carregados axialmente. Tais problemas, devido à sua importância, devem ser analisados cuidadosamente aquando do dimensionamento [5].

2.1.1. Tipos de instabilidade estrutural

Uma estrutura sujeita a um carregamento irá, inevitavelmente, sofrer um deslocamento que será tanto maior quanto maior for o valor do carregamento. A instabilidade de uma estrutura, que evolui ao longo de uma trajectória de equilíbrio (relação carga-deslocamento), corresponde à transição de uma configuração de equilíbrio estável para instável. Assim, a instabilidade pode ocorrer de duas formas [5]:

- **Instabilidade bifurcacional;**
- **Instabilidade por ponto limite ou por “snap-through”;**

2.1.1.1. Instabilidade bifurcacional

Todos os problemas de instabilidade bifurcacional apresentam as seguintes características:

- Trajectória de equilíbrio fundamental (linear ou não linear), que se inicia na origem do diagrama carga-deslocamento;
- Trajectória de equilíbrio de pós-encurvadura, que não passa pela origem do diagrama carga-deslocamento;
- Um ponto de bifurcação, no qual as configurações de equilíbrio da trajectória fundamental passam de estáveis a instáveis;

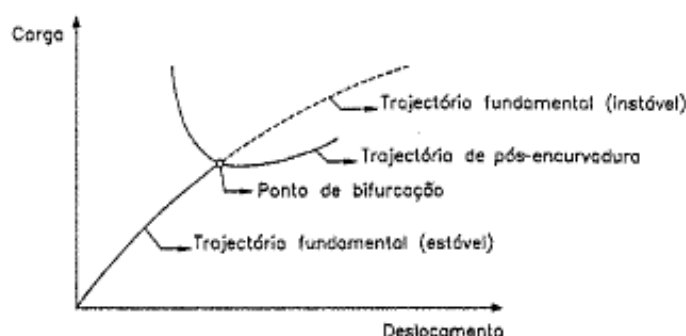


Figura 2.2 – Instabilidade Bifurcacional [5].

O ponto de bifurcação surge quando a carga que atua sobre o elemento atinge um dado valor crítico (carga crítica). A partir desse ponto passa a existir um equilíbrio instável na trajectória fundamental. Quando se analisa este tipo de problemas, é importante determinar as coordenadas

do ponto de bifurcação, a deformada da estrutura aquando da bifurcação e as propriedades da trajectória de pós-encurvadura [5].

De seguida serão abordados, simplificadamente, alguns casos em que ocorre instabilidade bifurcacional.

Coluna de Euler

A coluna de Euler é um dos modelos mais conhecidos para descrever este tipo de instabilidade e explica bem este fenómeno. Assim, considere-se uma coluna elástica de comprimento l , simplesmente apoiada e submetida a uma carga axial P .

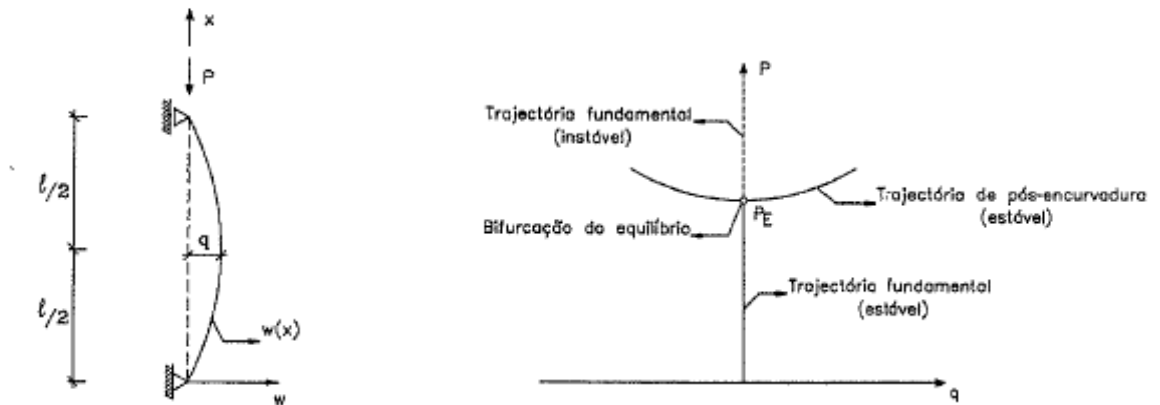


Figura 2.3 – Geometria da coluna de Euler sujeita a um carregamento de compressão axial e respetivas trajectórias de equilíbrio [5].

O ponto de bifurcação, onde se intersecta a trajectória fundamental com a de pós-encurvadura, está associado a um valor de carga crítica, $P = P_E$, sendo P_E dado por [5]:

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (2.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de principal de inércia em relação ao eixo de flexão considerado e l é o comprimento da coluna [21].

A carga crítica está associada ao seguinte modo de instabilidade:

$$w(x) = q \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2.2)$$

A trajectória fundamental verifica-se para $q=0$ (consequentemente, $w(x)=0$) e a trajectória de pós-encurvadura verifica-se para $q \neq 0$ ($w(x) \neq 0$). Como já foi dito, a intersecção destas duas

trajetórias dá-se para $P=P_E$ e $q=0$, fazendo com que nesse ponto ocorra uma bifurcação de equilíbrio [5].

Coluna tubular comprimida

Considere-se uma coluna tubular metálica sujeita a uma carga axial P .

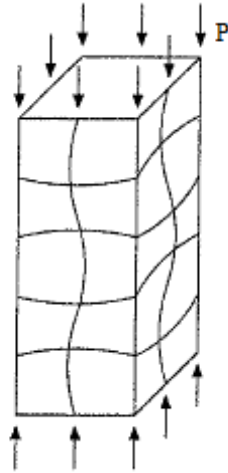


Figura 2.4 – Coluna tubular metálica sujeita a carga axial P [5]

Tendo em conta que a carga P está distribuída pelas paredes da coluna, estas estão submetidas a uma tensão de compressão uniforme, σ , de valor igual a P/A , em que A é a área da secção transversal da coluna. Quando a tensão aplicada atinge um valor crítico, σ_{cr} , as chapas que constituem a parede podem entrar em instabilidade, permanecendo as arestas retas. Este fenómeno de instabilidade local é também conhecido por encurvadura local ou encurvadura de placa [5].

Placa comprimida

Considere-se uma placa quadrada simplesmente apoiada em todo o seu contorno e submetida a compressão uniforme.

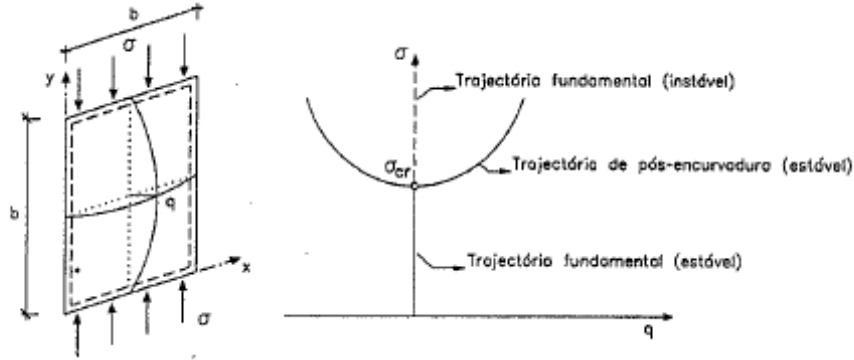


Figura 2.5 – Placa quadrada sujeita a compressão axial e respectivas trajectórias de equilíbrio [5]

O comportamento de uma placa comprimida é muito semelhante ao da coluna de Euler pois, tanto numa como noutra peça, a trajectória fundamental é instável para $\sigma > \sigma_{cr}$ e a trajectória de pós-encurvadura é estável, como se pode observar nas Figuras 2.3 e 2.5 [5].

Relativamente ao modo de instabilidade da placa, é ligeiramente diferente ao da coluna de Euler pois, em vez de ter apenas um plano de encurvadura, a placa apresenta dois planos de encurvadura (x e y). Assim, tem-se:

$$w(x, y) = q \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (2.3)$$

A tensão crítica é dada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2.4)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do material e t é a espessura da placa.

Relativamente à trajectória de pós-encurvadura, esta é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1 + \frac{3}{8}(1 - \nu^2) \left(\frac{q}{t}\right)^2 \quad (2.5)$$

Quando se compara o comportamento da coluna de Euler com o da placa comprimida, observam-se muitas semelhanças. No entanto, existe uma diferença facilmente perceptível relativamente à trajectória da curvatura. No caso da placa, a trajectória de pós-encurvadura é bastante mais acentuada do que na coluna [5].

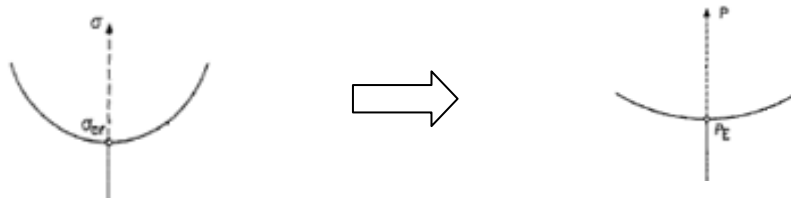


Figura 2.6 – Comparação entre as trajectórias de pós-encurvadura da placa com a da coluna.

Este fenómeno é explicado pelo facto das placas possuírem uma resistência de pós-encurvadura elevada. Quando a placa é comprimida, deforma-se, o que faz com que surjam tensões de tração de membrana que aumentam a rigidez da mesma, quando os bordos impedem a deformação transversal. Através de um exemplo numérico, é fácil confirmar a afirmação anterior.

Exemplo: Para deslocamentos da placa igual à metade da sua espessura e da coluna igual a 5% do vão, quais as cargas que estão a actuar respectivamente.

Coluna

$$q = 0,05l$$

$$\frac{P}{P_E} = 1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\pi}{1} \right)^2 (0,05l)^2 \quad (=\) \quad \frac{P}{P_E} = 1 + \frac{1}{8} \pi^2 0,05^2 \quad (=\) \quad \mathbf{P = 1,003P_E} \quad (2.6)$$

Placa

$$q = 0,5t$$

$$v = 0,30$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1 + \frac{3}{8} (1 - 0,3^2) \left(\frac{0,5t}{t} \right)^2 \quad (=\) \quad \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1 + \frac{3}{8} (0,91) (0,5)^2 \quad (=\) \quad \mathbf{\sigma = 1,085\sigma_{cr}} \quad (2.7)$$

Através deste exemplo, conclui-se que, para obter deslocamentos relativamente semelhantes, é necessário exercer um valor de carga consideravelmente superior nas placas.

2.1.1.2. Instabilidade por ponto limite ou por “snap-through”

Relativamente aos tipos de instabilidade, este trabalho vai estar focado essencialmente sobre a instabilidade bifurcacional, pois os elementos estruturais que serão analisados estão sujeitos fundamentalmente a este tipo de instabilidade. Assim, serão dadas apenas noções gerais sobre a instabilidade por ponto limite ou por “snap-through”.

Um problema de instabilidade por ponto limite pode ser representado esquematicamente pela figura seguinte.

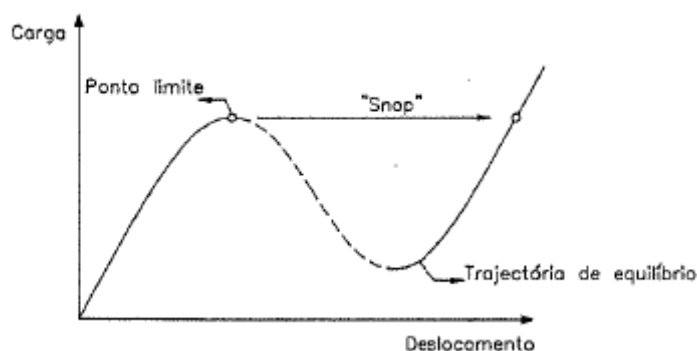


Figura 2.7 – Representação esquemática de um problema de instabilidade por ponto limite [5].

A instabilidade por “snap-through”, tal como a instabilidade por bifurcação, é caracterizada por uma trajetória de equilíbrio que se inicia na origem do diagrama carga-deslocamento. No entanto, enquanto que na instabilidade por bifurcação a trajetória pode ser linear ou não linear, neste segundo tipo de instabilidade a trajetória é sempre não linear. Neste problema existe um ponto limite, semelhante ao ponto de bifurcação, onde as configurações de equilíbrio passam de estáveis a instáveis. Este tipo de instabilidade é caracterizado principalmente pela existência de um fenómeno chamado “snap” que consiste na passagem “dinâmica” da estrutura para uma configuração de equilíbrio afastada e estável. Este fenómeno ocorre quando se aumenta a carga até a estrutura atingir um dado ponto limite [5].

Para se analisar este tipo de problema, é necessário determinar o andamento da trajetória de equilíbrio não-linear e as coordenadas do ponto limite, sendo essencial recorrer a métodos de análise estrutural ou numérica, como: Método dos Elementos Finitos, Método das Diferenças Finitas, etc [5].

2.1.2. Estabilidade de barras com secção de parede fina aberta

Os elementos metálicos, nomeadamente os perfis enformados a frio, apresentam uma reduzida rigidez de torção e podem-se deformar com relativa facilidade. A elevada esbelteza dos perfis faz com que estes se tornem bastante susceptíveis a fenómenos de instabilidade. Esses fenómenos, que podem ser de natureza global ou local, devem ser considerados de modo a que se possa fazer uma determinação precisa do comportamento dos perfis.

2.1.2.1. Fenómenos de instabilidade global

Quando o eixo longitudinal da barra se deforma e as secções transversais que constituem os perfis sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido, está-se perante um fenómeno de instabilidade global. A instabilidade pode ocorrer tanto por flexão ou flexão-torção em colunas (barras comprimidas, em que as secções transversais sofrem translação) como por flexão-torção em vigas, que instabilizam lateralmente (barras fletidas, em que as secções transversais sofrem, simultaneamente, translação e rotação) – ocorre flexão lateral, perpendicular ao plano de carregamento, caracterizado por um deslocamento do centro de torção e uma torção caracterizada por uma rotação [22] [23] [24].

2.1.2.2. Fenómenos de instabilidade local

Quando o eixo longitudinal da barra não se deforma e as secções transversais sofrem deformações ao longo do seu próprio plano, está-se perante um fenómeno de instabilidade local. Estes fenómenos de instabilidade podem ser de dois tipos: modos locais de placa, onde apenas ocorrem deslocamentos de flexão das paredes do perfil, e modos distorcionais, onde os bordos longitudinais internos sofrem simultaneamente rotações e translações e onde a instabilidade ocorre por torção de uma barra do perfil em torno de um bordo interno e as restantes barras exibem deformações de flexão, por compatibilidade [8] [22] [23] [24].

Qualquer dos modos de instabilidade referidos acima, quer global quer local, pode ser crítico. A definição destes modos como críticos ou não críticos depende da geometria do perfil (formato e dimensões da secção transversal), das condições de apoio da barra (encastada ou apoiada nas extremidades) e do carregamento a que o elemento está a ser sujeito (compressão/tração, flexão ou combinação de ambos). Quando as barras são consideradas “longas”, a instabilidade predominante ou crítica é a global; quando são “intermédias” ou “curtas”, são particularmente sensíveis a fenómenos de instabilidade local. Dentro destes últimos fenómenos, o modo distorcional é característico das barras “intermédias” e o modo local dominante nas barras

“curtas”. Existem situações em que ocorre mais do que um modo de instabilidade em simultâneo, surgindo uma bifurcação simultânea e existindo fenómenos de interação entre modos de instabilidade. Estes fenómenos de interação, embora sejam bastante importantes, não serão abordados nesta dissertação, aconselhando-se a consulta de [22] [23].

Observando a figura abaixo, obtida a partir do CUFSM, programa que executa análises elásticas da encurvadura de elementos esbeltos [25], é possível verificar a configuração deformada de uma secção nos diferentes modos de instabilidade.

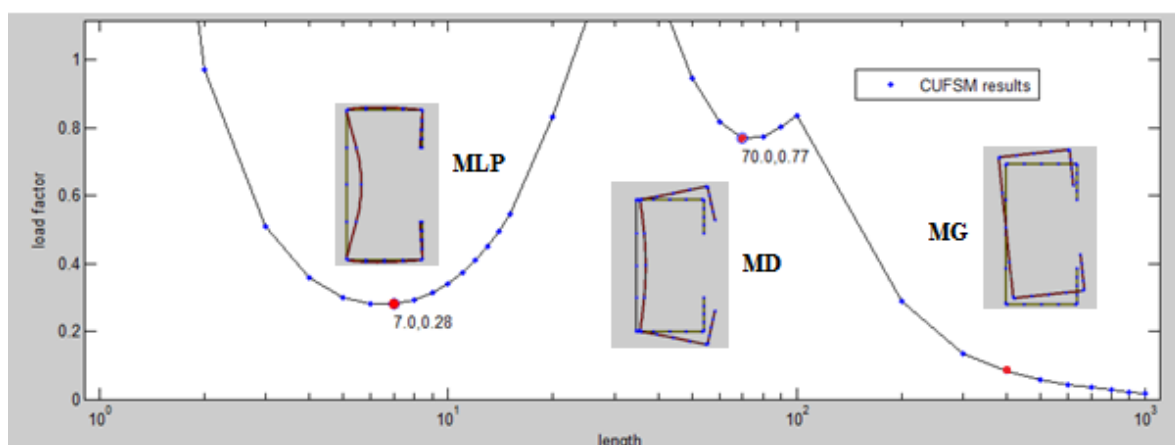


Figura 2.8 – Diferentes modos de instabilidade de uma barra sujeita à compressão (MLP – Modo local de placa, MD – Modo distorcional e MG – Modo global).

2.1.2.2.1. Modo local de placa

Este modo de instabilidade é caracterizado pela deformação das secções devida à flexão das paredes interiores e pelo eixo longitudinal da barra permanecer indeformado. Os bordos longitudinais internos, que unem duas paredes adjacentes, sofrem apenas rotações, não havendo qualquer movimento de translação. Relativamente às paredes externas, com apenas uma parede adjacente, com bordo livre sofrem, essencialmente, deslocamentos de corpo rígido. Os cantos que ligam os diferentes elementos da secção não sofrem movimentos relativos [8] [22] [23].

Os elementos enformados a frio podem ser encarados como um conjunto de placas longas, ligadas entre si ao longo dos respectivos bordos longitudinais. A instabilidade em elementos deste tipo é geralmente condicionada pelo comportamento da parede mais susceptível de instabilizar por flexão, cuja localização depende da esbelteza das várias paredes da secção e da distribuição das tensões atuantes.

O estudo de elementos sujeitos a instabilidade local é geralmente feito com recurso a métodos numéricos, devido à sua complexidade.

2.1.2.2.2. Modo distorcional

A distorção é um modo de instabilidade cuja análise no dimensionamento é algo complexa devido aos cálculos que envolve. Pode ocorrer quando uma secção está sujeita à compressão e/ou à flexão [22] [15].

A instabilidade distorcional é caracterizada por rotações e translações ao nível dos bordos longitudinais internos da barra. A deformação da secção tem origem na flexão da alma e as restantes paredes sofrem rotação e translação por compatibilidade. As secções adjacentes aos reforços sofrem deslocamentos de corpo rígido (ver Figura 2.8).

Este modo encontra-se entre o modo local de placa e o global pois apresenta características de ambos. As paredes internas sofrem flexão (modo local) mas os nós da secção sofrem deslocamentos e partes da secção sofrem deformações de corpo rígido (modo global).

A instabilidade distorcional está, muitas vezes, relacionada com a presença de reforços. Se uma determinada secção não possuir reforços e dependendo do nº de paredes da secção, este modo de instabilidade pode não ocorrer. Assim, apesar da presença de reforços melhorar o desempenho do elemento estrutural, tem a desvantagem de poder levar à ocorrência deste modo.

Tal como para elementos sujeitos a instabilidade local de placa, o estudo de elementos sujeitos a este modo de instabilidade é feito recorrendo a métodos numéricos.

2.1.3. Tipos de análise de estabilidade

Segundo Reis e Camotim [5], o comportamento de uma estrutura submetida a um conjunto de ações define-se como a relação que existe entre os valores dessas ações e dos efeitos por elas provocados na estrutura. Assim, a análise de estabilidade de uma estrutura envolve o estabelecimento das equações de equilíbrio na sua configuração deformada e/ou a consideração de relações cinemáticas não lineares, ou seja, análises geometricamente não lineares.

Em termos geométricos, a análise de uma estrutura pode ser: linear, onde a determinação de esforços, tensões e deslocamentos provocados pelas ações submetidas à estrutura é feita admitindo que esta mantém a sua configuração indeformada; ou não-linear, onde os esforços, tensões e deslocamentos são calculados tendo em conta a deformação da estrutura [5].

Uma análise de estabilidade é sempre geometricamente não-linear. Contudo, esta análise pode ser de dois tipos: um envolvendo apenas a determinação das cargas de bifurcação e dos modos de instabilidade (análise linear de estabilidade) e outro para determinação do comportamento de pós-encurvadura da estrutura (análise não linear de estabilidade) [5] [26].

2.1.3.1. Análise linear de estabilidade

Este tipo de análise aplica-se apenas a problemas de instabilidade bifurcacional e não fornece qualquer informação relativamente ao comportamento de pós-encurvadura, tendo apenas como objectivo determinar as cargas de bifurcação e os modos de instabilidade.

Segundo Reis e Camotim [5], neste tipo de análise estabelecem-se as equações de equilíbrio na configuração deformada, linearizando-se depois essas equações relativamente aos deslocamentos que definem os modos de instabilidade. Assim, tudo se passa como se se estabelecessem as equações de equilíbrio numa configuração deformada pouco afastada da trajectória fundamental.

Através de uma análise linear de estabilidade podem-se identificar os pontos da trajectória fundamental onde existe uma configuração de equilíbrio adjacente e caracterizar cinematicamente essa nova configuração de equilíbrio. Do ponto de vista matemático, efectuar este tipo de análise corresponde a resolver um problema de valores e vetores próprios [15] [26].

Refira-se que no Eurocódigo 3, onde se baseia o dimensionamento neste trabalho, as tensões críticas de encurvadura são calculadas a partir de uma análise linear de estabilidade.

2.1.3.2. Análise não linear de estabilidade

Uma análise não linear de estabilidade é feita quando se pretende determinar o comportamento de pós-encurvadura de uma estrutura, considerando termos não lineares nas equações de equilíbrio. Este tipo de análise envolve a consideração de estruturas reais com imperfeições e tensões iniciais e a determinação de trajectórias de equilíbrio não lineares, da evolução das tensões com o parâmetro de carga e do modo de colapso da estrutura [5] [26].

Normalmente, é possível fazer uma análise de pós-encurvadura mais simples na qual se retêm apenas os termos não nulos de ordem imediatamente superior à primeira. Esta análise é apenas válida para pequenos valores dos parâmetros de deformação e permite caracterizar adequadamente o comportamento na vizinhança do ponto de bifurcação [5].

2.2. Características gerais de elementos enformados a frio

A concepção e o dimensionamento de elementos enformados a frio são relativamente complexos, existindo problemas que normalmente não se encontram em elementos laminados a quente.

Esses problemas estão associados a diversos fatores que são apresentados em seguida:

- **Encurvadura local e Pós-Encurvadura local** – Os elementos enformados a frio apresentam uma relação comprimento/espessura elevada, o que faz com que estes possam encurvar para valores de tensão inferiores aos da tensão de cedência quando sujeitos a diferentes tipos de carregamento (compressão axial, momento fletor). Mesmo depois do elemento sofrer encurvadura local, continua a suportar o acréscimo de carga através da redistribuição de tensões ao longo dos elementos comprimidos, atingindo tensões próximas ou superiores à tensão crítica de encurvadura sem colapsar. A resistência de pós-encurvadura pode assim ser consideravelmente maior do que a resistência determinada através da tensão crítica de encurvadura [10].

Tendo em conta que a resistência de pós-encurvadura permite um aumento das cargas suportadas pelos elementos estruturais, pode ser adequado fazer o dimensionamento com base neste tipo de resistência em vez da tensão crítica de encurvadura [10].

- **Torção** – Como já se referiu, as secções enformadas a frio têm uma reduzida espessura, e quando essas secções são abertas apresentam uma baixa rigidez de torção. Em muitas secções enformadas a frio, a posição do centro de corte não é coincidente com a do centro de gravidade. Para que haja deformação por flexão sem torção, a carga deve ser aplicada segundo o eixo correspondente ao centro de corte, caso contrário, existindo excentricidade entre o eixo de ação de cargas e o centro de corte, a secção sofrerá consideráveis deformações por torção. Assim, é necessário que estes tipos de elementos

sejam restringidos à torção, em intervalos regulares ou continuamente ao longo de todo o seu comprimento, para prevenir eventuais deformações por torção [27].

- **Distorção** – Este modo pode ocorrer em elementos sujeitos à flexão ou à compressão [27]. A instabilidade distorcional caracteriza-se pela alma da secção sofrer flexão e as restantes paredes sofrerem rotação e translação por compatibilidade. As secções adjacentes aos reforços sofrem deslocamentos de corpo rígido [26].

Tal como já foi dito antes, a presença de reforços na secção influencia este tipo de instabilidade podendo torná-la crítica. Assim, a distorção é, normalmente, a instabilidade com mais destaque quando existem reforços. Apesar dos reforços acentuarem o efeito da distorção estes melhorarem consideravelmente o desempenho do elemento estrutural, nomeadamente na capacidade de suporte de carga e no comportamento face à encurvadura em elementos sujeitos à compressão, sendo por isso vantajoso a introdução de reforços nas secções [10].

- **Enformagem a frio** – A operação de enformagem a frio aumenta a tensão resistente última e a tensão de cedência e, ao mesmo tempo, existe uma redução proporcional da ductibilidade do material. Os cantos da secção são enformados a um grau consideravelmente maior do que os elementos planos, o que leva a que existam diferentes propriedades mecânicas em diversos pontos da secção transversal e que estes tenham uma maior resistência. Sendo as secções constituídas por elementos planos e curvos (cantos) e, tendo em conta que estes últimos são mais resistentes, a encurvadura iniciará sempre no elemento mais fraco (elemento plano), com piores propriedades mecânicas e maior esbelteza [10] [27].

- **Secções efetivas** – A noção de que uma chapa plana pode encurvar e ainda possuir resistência, a chamada resistência de pós-encurvadura, é um conceito presente nas especificações de estruturas de aço. Para atingir essa resistência, é necessário que a placa seja suportada ao longo das suas extremidades ou que seja reforçada por elementos, que formam, habitualmente, um ângulo recto (ver figura 2.9). Estes elementos de reforço podem ser obtidos através da enformagem a frio do aço, dobrando-se a folha. Os perfis enformados a frio apresentam uma relação largura/espessura muito alta, encurvando mesmo quando sujeitos a tensões de compressão reduzidas. No entanto, os extremos reforçados da placa permanecem estáveis e uma determinada largura da mesma, próximo dos cantos, permanece “efetiva”, resistindo posteriormente a cargas de compressão. A grande dificuldade

reside em determinar a parcela da largura inicial da placa que permanece efetiva. Essa largura denomina-se de largura efetiva [27].

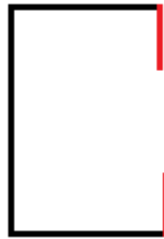


Figura 2.9 – Seção em C com reforços nas extremidades.

2.3. Método da largura efetiva (MLE)

O Método da largura efetiva é utilizado no Eurocódigo 3 com o objectivo de incluir os fenómenos de instabilidade local no dimensionamento de elementos enformados a frio [10].

Em elementos reforçados sujeitos à compressão, quando a tensão de encurvadura é atingida não se dá o colapso do elemento, pois este consegue suportar um carregamento adicional através da redistribuição das tensões. Este fenómeno é conhecido por resistência de pós-encurvadura. O comportamento de pós-encurvadura pode ser analisado utilizando a Teoria da Grande Deflexão (large defection theory), em que se utiliza uma equação diferencial extensa para analisar a encurvadura por flexão de uma placa [28]; no entanto a aplicação prática dessa teoria não é usual devido à sua complexidade. Assim, em 1932, Von Karman introduziu o conceito da “Largura Efetiva”, onde, em vez de se considerar uma distribuição de tensão não uniforme ao longo de toda a largura do elemento, se assume que a totalidade do carregamento é suportada por uma largura efetiva fictícia, b_{eff} , sujeita a uma tensão distribuída uniforme igual à tensão máxima na extremidade, $\sigma_{max,e}$ [28].

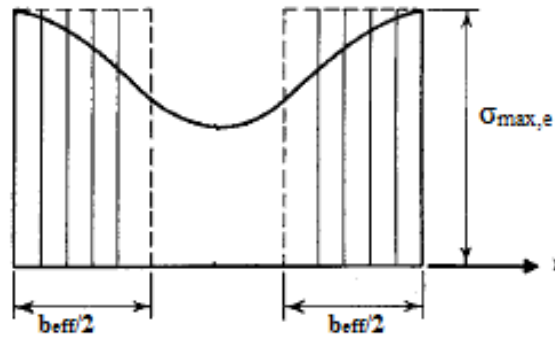


Figura 2.10 – Largura efetiva [28].

A largura b_{eff} é seleccionada de modo a que a área delimitada pela curva seja igual á soma das áreas dos dois rectangulos.

Pode-se também considerar que a largura efetiva representa uma largura específica da placa que apenas encurva quando a tensão de compressão atinge a tensão de cedência do aço. Assim, o valor de b_{eff} é dado por:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{ced}}} \quad (2.8)$$

Em 1946, Winter sugeriu a seguinte modificação para a expressão da largura efetiva [28].

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{ced}}} \cdot \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{ced}}}\right) = (\bar{\lambda}_p - 0,25) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (2.9)$$

em que $\bar{\lambda}_p$ é a esbelteza normalizada ou relativa do elemento e é dada por $\sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}}$.

Mais tarde, o coeficiente 0,25 foi alterado para 0,22 [28].

3. Dimensionamento segundo o Eurocódigo 3

Neste capítulo, irão ser analisados os principais aspetos que devem ser abordados para um correcto dimensionamento de um elemento de aço enformado a frio. Para tal, as Partes 1-1, 1-3 e 1-5 do Eurocódigo 3 servirão de referência e de auxílio em todos os pontos deste capítulo.

3.1. Propriedades das secções

O cálculo das propriedades das secções é o primeiro passo a efetuar quando se pretende fazer o dimensionamento de secções de aço. Em elementos enformados a frio, o cálculo pode-se tornar consideravelmente complexo, visto que as secções além de apresentarem chapas planas apresentam também cantos curvos, o que complica a obtenção de todos os parâmetros relacionados com as propriedades das secções (áreas, inércias, centros de corte, etc). De seguida irão ser abordados os aspetos que permitem obter as características gerais das secções.

3.1.1. Eixos convencionais das secções

No dimensionamento de aço enformado a frio, é necessário definir a convenção dos eixos ortogonais das secções, de acordo com a documentação oficial que, neste caso, são os Eurocódigos. De acordo com a EN 1993-1-3 (ou seja, a Parte 1-3 do Eurocódigo 3), o eixo x é o eixo longitudinal do elemento (não visível quando se olha para a secção transversal), o eixo y é o eixo da secção transversal paralelo aos banzos e o eixo z é o eixo da secção perpendicular aos banzos. O Eurocódigo 3 define ainda outros dois eixos que também podem ser utilizados, o eixo u , eixo de maior inércia da secção, e o eixo v , eixo de menor inércia da secção, os quais podem ou não coincidir com os eixos y e z . Todos os eixos devem ter origem no centro de gravidade da respetiva secção.

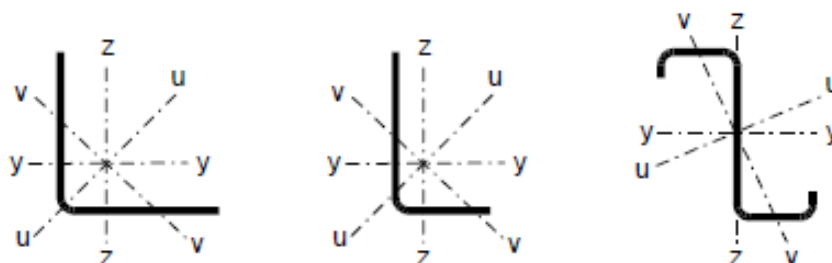


Figura 3.1 – Convenção dos eixos ortogonais de uma secção transversal em C [1].

3.1.2. Geometria e dimensões das secções

Os perfis de aço enformado a frio podem ser obtidos através de quinagem ou de laminagem a frio, podendo as secções tomar, praticamente, todas as formas que se pretendam. Devido ao processo de fabrico, as secções são, geralmente, abertas e simétricas relativamente a apenas um eixo. Os tipos mais comuns de secções transversais utilizados são em U, C, Z e “Hat” [7].

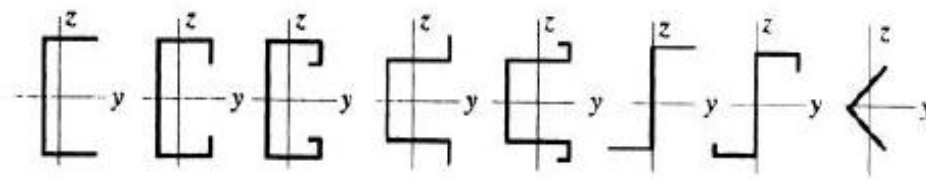


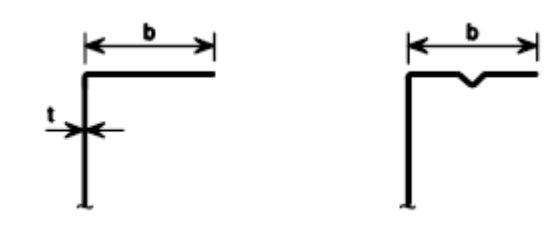
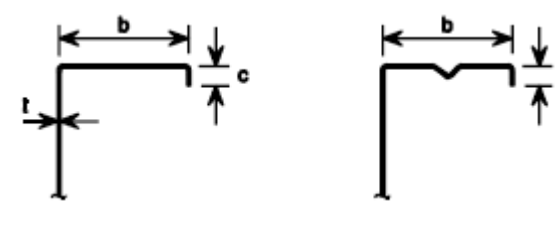
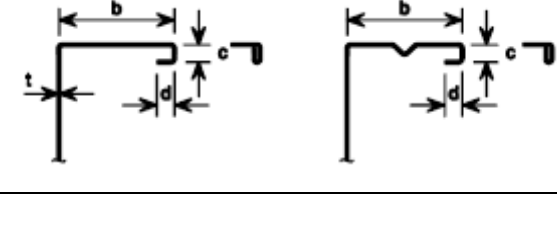

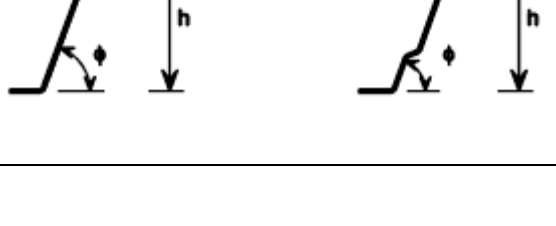
Figura 3.2 – Tipos de secções transversais [7].

Relativamente às dimensões das secções enformadas a frio, estas podem ser representadas por (ver Tabela 3.1):

- Dimensões medidas pelo exterior da secção: altura (h), banzos (b) e reforços (c ou d , consoante o número de reforços);
- Espessura dos elementos (t);
- Raios interiores das dobragens da secção (r);
- Ângulos entre os vários elementos da secção (Φ);

Ainda relativamente às dimensões dos perfis de aço enformado a frio, a EN 1993-1-3 define limites para a relação largura-espessura dos elementos, que não devem ser ultrapassados aquando do dimensionamento dos mesmos. Estes limites das dimensões dos elementos da secção transversal, que são apresentados na Tabela 3.1, foram obtidos com base na experiência e nos resultados de diversos testes [1].

Tabela 3.1 – Limites relativos à relação largura – espessura de elementos de aço enformado a frio [1].

Elemento da secção transversal	Valor máximo
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \Phi$

Relativamente aos reforços, para que estes tenham uma rigidez suficiente, os seguintes requisitos devem ser cumpridos:

- $0,2 \leq c/b \leq 0,6$
- $0,1 \leq d/b \leq 0,3$

Se $c/b \leq 0,2$ ou $d/b \leq 0,1$, então os reforços devem ser desprezados ($c=0$ ou $d=0$).

3.1.3. Propriedades do material e das secções

Para se efectuar o dimensionamento dos perfis de aço, há que definir as propriedades do material e os fatores de segurança. O Eurocódigo 3 fornece os seguintes valores:

- Módulo de elasticidade, parâmetro que define a rigidez axial do material: $E = 210 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de Poisson, parâmetro que relaciona a deformação transversal e longitudinal de um material homogéneo e isotrópico: $\nu = 0,30$;
- Módulo de Distorção, parâmetro que define a rigidez de corte do material: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 81 \text{ GPa}$;
- Relativamente aos coeficientes parciais de segurança, são definidos na EN1993-1-3, podendo assumir valores diferentes no Anexo Nacional (como esta norma não está ainda adaptada para Portugal, não existe Anexo Nacional):
 - $\gamma_{M0} = 1,00$ é o coeficiente relativo à resistência das secções à cedência, incluindo fenómenos de encurvadura local e distorcional;
 - $\gamma_{M1} = 1,00$ é o coeficiente relativo à resistência dos elementos e das chapas à encurvadura global;
 - $\gamma_{M2} = 1,25$ é o coeficiente relativo à resistência das ligações.

A EN 1993-1-3 define ainda 3 tipos de “classes estruturais” para construções constituídas por elementos de parede fina enformados a frio:

- **Classe Estrutural I** – Os perfis e chapas são projetados para contribuírem para a resistência e estabilidade global da estrutura;
- **Classe Estrutural II** – Os perfis e chapas são projetados para contribuírem para a resistência e estabilidade dos elementos estruturais individuais;
- **Classe Estrutural III** – As placas são utilizadas como elementos que apenas transferem cargas à estrutura.

Esta classificação permite apenas ter uma noção do papel dos perfis e das chapas nas construções, a nível estrutural, visto que não tem qualquer influência no seu dimensionamento. As classes estruturais são necessárias aquando da execução da construção.

Outra propriedade que também caracteriza o material é a sua capacidade de resistir aos esforços a que é sujeito. Essa capacidade varia com o tipo de aço e com o processo de enformagem. Assim, os parâmetros que definem a resistência do material são:

- Tensão nominal de cedência (f_{yb});
- Tensão de cedência média (f_{ya});
- Tensão nominal última (f_u);

O Eurocódigo 3 fornece os valores nominais das propriedades do material que devem ser adotados nos cálculos de dimensionamento. Esses valores dependem do tipo e classe do aço (f_{yb} e f_u).

A tensão de cedência média (f_{ya}) de uma secção transversal enformada a frio pode ser determinada a partir de resultados de ensaios ou através da seguinte expressão:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A_g} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (3.1)$$

em que:

- A_g é a área da secção transversal bruta;
- k é um coeficiente numérico que depende do tipo de enformagem, assumindo o valor de 7 para a laminagem a frio e de 5 para outros tipos de enformagem;
- t é a espessura das chapas de aço antes da enformagem a frio;
- n é o número de dobras de 90° da secção transversal com um raio interno $r \leq 5t$. Frações de dobras de 90° devem ser consideradas como frações de n .

A tensão de cedência média (f_{ya}) pode ser utilizada em elementos carregados axialmente em que a área da secção transversal efetiva seja igual à área da secção transversal bruta.

A EN 1993-1-3 define também limites para a espessura nuclear, t_{cor} . Esta espessura é a que deve ser utilizada no dimensionamento e é limitada da seguinte forma e corresponde à espessura da chapa antes do processo de enformagem a frio.

$$0,45 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm}$$

A espessura nuclear é obtida através de:

$$t_{cor} = (t_{nom} - t_{rev \text{ met}}) \quad \text{para } tol \leq 5\% \quad (3.2)$$

$$t_{cor} = (t_{nom} - t_{rev \text{ met}}) \cdot \frac{100 - tol}{95} \quad \text{para } tol > 5\% \quad (3.3)$$

em que:

- t_{nom} é a espessura nominal da chapa depois da enformagem a frio;
- $t_{rev \text{ met}}$ é a espessura do revestimento metálico, admitindo-se que é igual a 0,04mm para revestimento de zinco;
- tol é uma tolerância relacionada com o processo de fabrico, em geral inferior a 5%;

3.1.4. Secção transversal bruta

Devido à enformagem a frio, os cantos de elementos de paredes finas são arredondados, o que torna a forma da secção transversal mais complexa. Assim, são necessárias aproximações para se calcular a área da mesma.

A EN1993-1-3 define duas maneiras de calcular, aproximadamente, a secção transversal bruta:

- Dimensões medidas até à linha média do material (Figura 3.3);
- Dimensões medidas até ao ponto médio das curvas (Figura 3.4);

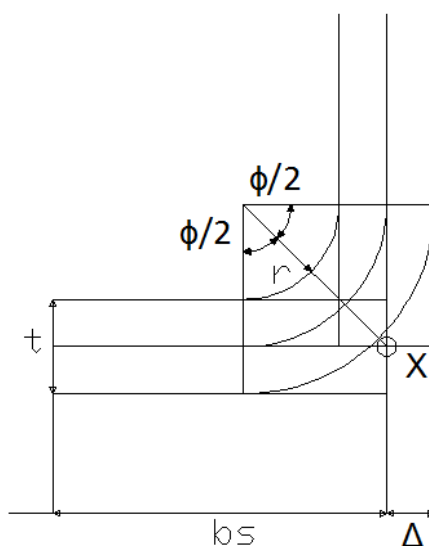


Figura 3.3 – Secção transversal bruta com as dimensões medidas até à linha média do material.

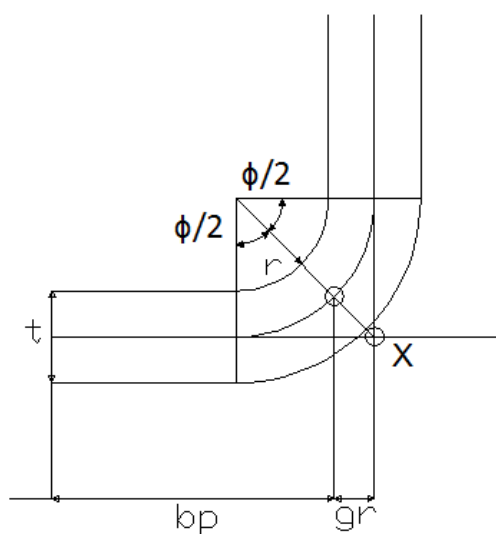


Figura 3.4 – Secção transversal bruta com as dimensões medidas até ao ponto médio das curvas.

em que:

- b_s é a largura plana do elemento até à linha média do elemento adjacente;
- b_p é a largura plana do elemento até ao ponto médio das curvas entre elementos;
- Δ corresponde a metade da espessura do elemento;
- gr corresponde à dimensão entre o ponto médio da curva da linha média e o ponto médio da curva do limite exterior do elemento.

A influência dos cantos arredondados pode ser desprezada para o cálculo da resistência sempre que o raio interno seja $r \leq 5t$ e $r \leq 0,10b_p$.

Para que os cantos arredondados sejam considerados, as propriedades da secção transversal são afetadas por um fator δ , dado por:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (3.4)$$

em que:

- r_j é o raio interno do elemento curvo j ;
- Φ_j é o ângulo entre dois elementos planos;
- $b_{p,i}$ é a largura plana do elemento i para uma secção transversal com cantos curvos;

As propriedades aproximadas da secção obtêm-se através de:

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad (3.5)$$

$$I_g \approx I_{g,sh}(1 - 2\delta) \quad (3.6)$$

$$I_w \approx I_{w,sh}(1 - 4\delta) \quad (3.7)$$

em que:

- A_g é a área bruta da secção transversal;
- $A_{g,sh}$ é o valor de A_g para uma secção transversal com cantos curvos;
- I_g é momento de inércia da secção transversal;
- $I_{g,sh}$ é o valor de I_g para uma secção com cantos curvos;
- I_w é a constante de empenamento da secção transversal;
- $I_{w,sh}$ é o valor de I_w para uma secção com cantos curvos;

3.1.5. Cálculo das propriedades segundo o anexo C da EN 1993-1-3

O anexo C da EN 1993-1-3 fornece expressões aproximadas para o cálculo das propriedades das secções.

Considerando uma secção transversal genérica, há que dividi-la em partes (alma, banzos, reforços), numerando-as de 1 a n. As extremidades dessas partes devem ser definidas por nós, de 0 a n. Assim, uma dada parte i da secção é delimitada pelos nós i-1 e i.

Na imagem abaixo, retirada da EN1993-1-3, pode-se ver um exemplo de uma secção transversal dividida em várias partes e os respectivos nós.

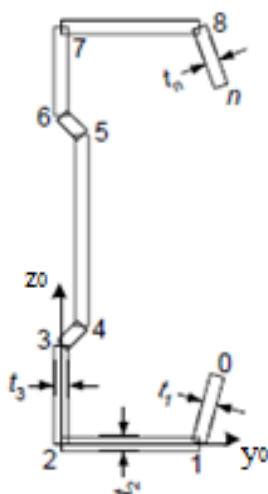


Figura 3.5 – Secção transversal em C dividida em várias partes definidas por nós [1].

De seguida é indicada a sequência de cálculos a efetuar para se obterem as propriedades de uma secção transversal.

- Área de uma parte da secção transversal

$$dA_i = \left[t_i \cdot \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \right] \quad (3.8)$$

- Área da secção transversal

$$A = \sum_{i=1}^n dA_i \quad (3.9)$$

- Momento estático da secção em torno de y_0 e coordenada z do centro de gravidade

$$S_{y0} = \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{2} \quad (3.10)$$

$$z_{cg} = \frac{S_{y0}}{A} \quad (3.11)$$

- Momento de inércia da secção em torno de y_0 e inércia aproximada da secção em torno de y (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$I_{y0} = \sum_{i=1}^n [(z_i)^2 + (z_{i-1})^2 + z_i \cdot z_{i-1}] \cdot \frac{dA_i}{3} \quad (3.12)$$

$$I_y = I_{y0} - A \cdot z_{cg}^2 \quad (3.13)$$

- Momento estático da secção em torno de z_0 e coordenada y do centro de gravidade

$$S_{z0} = \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{2} \quad (3.14)$$

$$y_{cg} = \frac{S_{z0}}{A} \quad (3.15)$$

- Momento de inércia da secção em torno de z_0 e inércia aproximada da secção em torno de z (eixo passando pelo centro de gravidade)

$$I_{z0} = \sum_{i=1}^n [(y_i)^2 + (y_{i-1})^2 + y_i \cdot y_{i-1}] \cdot \frac{dA_i}{3} \quad (3.16)$$

$$I_z = I_{z0} - A \cdot y_{cg}^2 \quad (3.17)$$

- Produto de inércia da secção em torno de yz_0 e inércia aproximada da secção em torno de yz

$$I_{yz0} = \sum_{i=1}^n (2 \cdot y_{i-1} \cdot z_{i-1} + 2 \cdot y_i \cdot z_i + y_{i-1} \cdot z_i + y_i \cdot z_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{6} \quad (3.18)$$

$$I_{yz} = I_{yz0} - \frac{S_{y0} \cdot S_{z0}}{A} \quad (3.19)$$

- Eixos principais e momentos principais de inércia da secção

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2I_{yz}}{I_z - I_y}\right) \text{ se } (I_z - I_y) \neq 0, \text{ caso contrário } \alpha = 0 \quad (3.20)$$

$$I_\xi = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z + \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}^2} \right] \quad (3.21)$$

$$I_\eta = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z - \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}^2} \right] \quad (3.22)$$

- Coordenadas setoriais

$$\omega_{0i} = y_{i-1} \cdot z_i - y_i \cdot z_{i-1} \quad (3.23)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \omega_{0i} \quad (3.24)$$

- Coordenadas setoriais médias

$$I_\omega = \sum_{i=1}^n (\omega_{i-1} + \omega_i) \cdot \frac{dA_i}{2} \quad (3.25)$$

$$\omega_{\text{mean}} = \frac{I_{\omega}}{A} \quad (3.26)$$

- Constantes setoriais

$$I_{y\omega_0} = \sum_{i=1}^n (2 \cdot y_{i-1} \cdot \omega_{i-1} + 2 \cdot y_i \cdot \omega_i + y_{i-1} \cdot \omega_i + 2 \cdot y_i \cdot \omega_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{6} \quad (3.27)$$

$$I_{y\omega} = I_{y\omega_0} - \frac{S_{y0} \cdot I_{\omega}}{A} \quad (3.28)$$

$$I_{z\omega_0} = \sum_{i=1}^n (2 \cdot \omega_{i-1} \cdot z_{i-1} + 2 \cdot \omega_i \cdot z_i + \omega_{i-1} \cdot z_i + 2 \cdot \omega_i \cdot z_{i-1}) \cdot \frac{dA_i}{6} \quad (3.29)$$

$$I_{z\omega} = I_{z\omega_0} - \frac{S_{y0} \cdot I_{\omega}}{A} \quad (3.30)$$

$$I_{\omega\omega_0} = \sum_{i=1}^n [(\omega_i)^2 + (\omega_{i-1})^2 + \omega_i \cdot \omega_{i-1}] \cdot \frac{dA_i}{3} \quad (3.31)$$

$$I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega_0} - \frac{I_{\omega}^2}{A} \quad (3.32)$$

Estes parâmetros setoriais dependem das dimensões dos elementos que constituem a secção e permitem calcular parâmetros relacionados com cada elemento que constitui a secção (coordenadas, constantes ou inércias). O cálculo destes parâmetros têm como principal objetivo a obtenção das coordenadas do centro de corte da secção e da constante de empenamento.

- Coordenadas do centro de corte da secção

$$y_{cc} = -\frac{I_{zw} \cdot I_z - I_{yw} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \quad z_{cc} = \frac{I_{yw} \cdot I_y - I_{zw} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \quad (3.33 \text{ e } 3.34)$$

- Distâncias entre o centro de corte e o centro de gravidade

$$y_s = y_{cc} - y_{cg} \quad (3.35)$$

$$z_s = z_{cc} - z_{cg} \quad (3.36)$$

- Constante de empenamento

$$I_w = I_{\omega\omega} + z_{cc} \cdot I_{y\omega} - y_{cc} \cdot I_{z\omega} \quad (3.37)$$

- Inércia de torção

$$I_t = \sum_{i=1}^n dA_i \cdot \frac{(t_i)^2}{3} \quad (3.38)$$

$$W_t = \frac{I_t}{\min(t)} \quad (3.39)$$

- Coordenada setorial relativamente ao centro de corte

$$\omega_{sj} = \omega_j - \omega_{\text{mean}} + z_{cc} \cdot (y_j - y_{cg}) - y_{cc} \cdot (z_j - z_{cg}) \quad (3.40)$$

- Coordenada setorial máxima e módulo de empenamento

$$\omega_{\max} = \max(|\omega_s|) \quad (3.41)$$

$$W_{\omega} = \frac{I_w}{\omega_{\max}} \quad (3.42)$$

- Momento polar de inércia relativamente ao centro de corte

$$I_p = I_y + I_z + A \cdot (y_s^2 + z_s^2) \quad (3.43)$$

- Coeficientes de assimetria z_j e y_j

$$z_j = z_s - \frac{0,5}{I_y} \cdot \sum_{i=1}^n [(z_{c_i})^3 + z_{c_i} \cdot \left[\frac{(z_i - z_{i-1})^2}{4} + (y_{c_i})^2 + \frac{(y_i - y_{i-1})^2}{12} \right] + y_{c_i} \cdot \frac{(y_i - y_{i-1}) \cdot (z_i - z_{i-1})}{6}] \cdot dA_i \quad (3.44)$$

$$y_j = y_s - \frac{0,5}{I_z} \cdot \sum_{i=1}^n [(y_{c_i})^3 + y_{c_i} \cdot \left[\frac{(y_i - y_{i-1})^2}{4} + (z_{c_i})^2 + \frac{(z_i - z_{i-1})^2}{12} \right] + z_{c_i} \cdot \frac{(z_i - z_{i-1}) \cdot (y_i - y_{i-1})}{6}] \cdot dA_i \quad (3.45)$$

onde:

$$y_{c_i} = \frac{y_i + y_{i-1}}{2} - y_{cg} \quad (3.46)$$

$$z_{c_i} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} - z_{cg} \quad (3.47)$$

3.2. Classificação das secções transversais

A classificação das secções transversais tem como objectivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

Como os elementos das secções de aço são em geral esbeltos, podem encurvar localmente quando sujeitos à compressão. Essa tendência dos elementos encurvarem pode limitar a carga que pode ser aplicada à secção, ou a resistência à flexão do elemento, limitando a encurvadura local. De modo a impedir que ocorram falhas prematuras devido à instabilidade local, pode limitar-se a relação largura-espessura dos elementos individuais da secção.

Tendo em conta o exposto acima, o Eurocódigo 3 especifica que as secções transversais podem ser classificadas em quatro diferentes classes:

- **Classe 1** – aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- **Classe 2** – aquelas que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;

- **Classe 3** – aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local impede que o momento resistente plástico seja atingido;
- **Classe 4** – aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal;

A classificação das secções depende dos seguintes parâmetros:

- Esbelteza dos elementos, definida pela relação comprimento-espessura;
- Distribuição das tensões ao longo dos elementos, podendo estes estarem sujeitos à compressão, à tração, à flexão simples ou composta (com compressão ou com tração);
- Condições de apoio dos elementos, podendo ser classificados como interiores, caso tenham dois pontos de apoio na secção, ou salientes, caso tenham apenas um ponto de apoio;
- Classe do aço, definida pela sua tensão de cedência. A partir da tensão de cedência é possível obter o parâmetro $\varepsilon = (235/f_y)^{0.5}$;
- Coeficiente de encurvadura do elemento (k_σ), necessário para elementos salientes [3];
- Posição da linha neutra na secção, refletida nos parâmetros Ψ e α [3];

Nos quadros apresentados abaixo são definidos os valores limites da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3. Um elemento que não satisfaça os limites impostos para a Classe 3 é considerado como sendo da Classe 4.

Tabela 3.2 – Limites máximos das relações largura-espessura para elementos internos comprimidos [3].

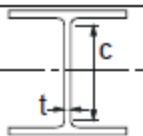
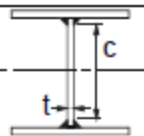
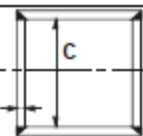
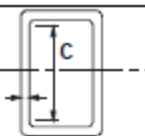
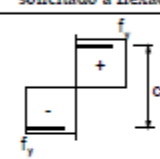
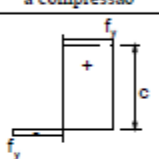
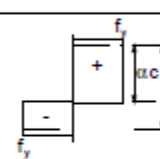
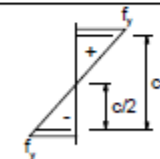
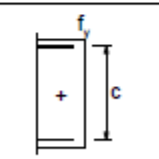
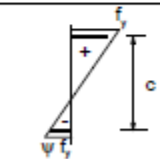
Componentes internos comprimidos						
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
				Eixo de flexão		
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$		
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$		quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$		quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tabela 3.3 – Limites máximos das relações largura-espessura para elementos externos comprimidos [3].

Banzos em consola							
Secções laminadas				Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão					
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)							
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$ Para k_{σ} ver a EN 1993-1-5					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

A classificação final de uma secção transversal depende da classe de cada um dos seus elementos. Assim, a classe da secção é sempre a maior das classes de cada elemento, visto ser esta a situação mais desfavorável, correspondendo pois a um dimensionamento mais conservativo.

3.3. Encurvadura local

Na concepção de elementos de paredes finas, a encurvadura local da secção transversal é um dos fenómenos mais importantes pois, tendo em conta a esbelteza dos elementos de aço enformado a frio, a encurvadura é um aspeto sempre presente e bastante condicionante. A elevada esbelteza dos elementos de aço enformado a frio faz com que grande parte destes seja de Classe 4, ou seja, ocorre encurvadura local dos elementos antes que se atinja a tensão de cedência nos mesmos. Assim, os efeitos da instabilidade local devem ser tidos em conta na determinação da resistência e rigidez dos elementos. De modo a contornar este problema, a secção transversal bruta é substituída por uma secção transversal efetiva, de menor área, que irá estar submetida a uma tensão máxima igual à tensão de cedência.

As propriedades efetivas da secção transversal podem ser calculadas utilizando o conceito da largura e espessura efetiva dos elementos individuais propensos a encurvar localmente.

A EN 1993-1-3 indica que a resistência da secção transversal deve ser calculada usando a tensão de cedência média quando um elemento é carregado por uma tensão de compressão e quando a secção transversal é totalmente efetiva com elementos comprimidos carregados axialmente.

As fórmulas de base para os cálculos da largura efetiva de um elemento de paredes finas sem reforços de compressão são apresentados na EN1993-1-5, sendo a largura efetiva do elemento i da secção transversal dada por:

$$b_{\text{eff},i} = \rho \times b_{p,i} \quad (3.48)$$

onde ρ é um coeficiente de redução que tem em conta o comportamento pós-encurvadura e que é obtido da seguinte forma:

- Para elementos comprimidos internos

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (3.49)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,055(3+\Psi)}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ onde } (3 + \Psi) \geq 0 \quad (3.50)$$

- Para elementos comprimidos externos

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \quad (3.51)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (3.52)$$

em que:

- Ψ é o rácio das tensões de compressão ou tração nas fibras extremas do elemento;
- $\bar{\lambda}_p$ é a esbelteza relativa, dada por:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} = 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot k_\sigma}} = \frac{b_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (3.53)$$

- b_p é a largura do elemento que está a ser analisado;
- k_σ é o coeficiente de encurvadura do elemento, que pode ser obtido através dos quadros indicados mais abaixo;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_{yb} é a tensão de cedência base;
- t é a espessura do elemento;
- σ_{cr} é a tensão crítica de instabilidade local do elemento, obtida através de:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_p^2} \quad (3.54)$$

em que ν é o coeficiente de Poisson do material e os outros símbolos têm o significado indicado acima.

A EN1993-1-5 define ainda outra forma de obter a largura efetiva, variando a forma como se obtém o coeficiente de redução em que, para além de se ter em conta a esbelteza relativa, se considera também uma nova esbelteza, a esbelteza reduzida $\bar{\lambda}_{p,red}$. O Eurocódigo 3 indica ainda que esta metodologia só pode ser utilizada se os valores de $\sigma_{com,Ed}$ e $\bar{\lambda}_{p,red}$ forem obtidos com base em análises de 2ª ordem onde sejam incorporadas as imperfeições globais da estrutura. As fórmulas seguintes podem ser utilizadas para calcular a área efetiva para tensões inferiores à de cedência e para calcular a área efetiva dos reforços, bem como a sua espessura efetiva.

EN1993-1-5 – Anexo E

- Para elementos comprimidos internos

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (3.55)$$

$$\rho = \frac{1-0,055 (3+\Psi)/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)} \leq 1,0 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad (3.56)$$

- Para elementos comprimidos externos

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{1-0,188/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)} \leq 1,0 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (3.57)$$

onde,

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb}/\gamma_{M0}}} \quad (3.58)$$

Tabela 3.4 – Valores dos coeficientes de encurvadura para elementos comprimidos internos [2].

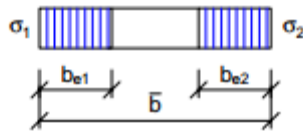
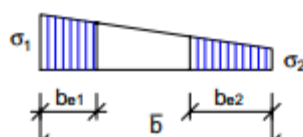
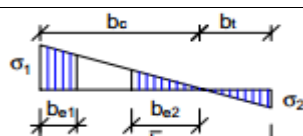
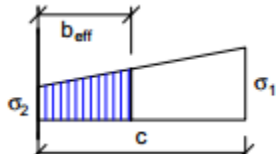
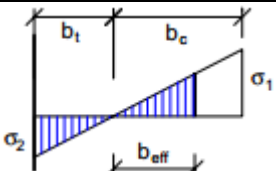
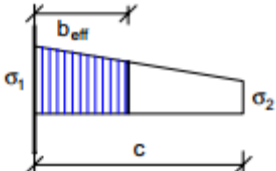
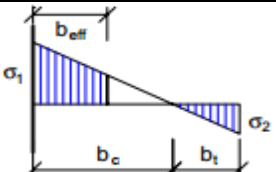
Distribuição das tensões (compressão positiva)				Largura efetiva b_{eff}		
				$\Psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \Psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\Psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\Psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \Psi)$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \Psi > 0$	0	$0 > \Psi > -1$	-1	$-1 > \Psi > -3$
Fator encurvadura k_σ	4	$8,2 / (1,05 + \Psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \Psi + 9,78 \Psi^2$	23,9	$5,98(1 - \Psi)^2$

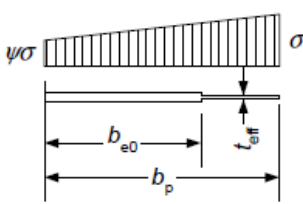
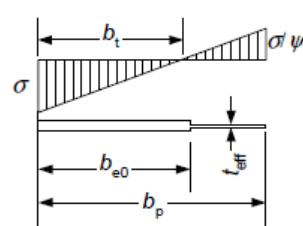
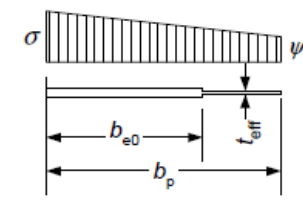
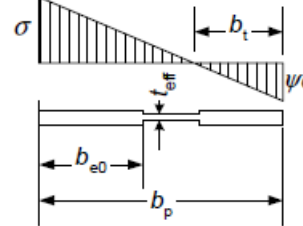
Tabela 3.5 – Valores dos coeficientes de encurvadura para elementos comprimidos externos [2].

Distribuição das tensões (compressão positiva)			Largura efetiva b_{eff}		
			$1 > \Psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$		
			$\Psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \Psi)$		
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$-1 \geq \Psi \geq -3$	
Fator encurvadura k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \Psi + 0,07 \Psi^2$	
			$1 > \Psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$		
			$\Psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \Psi)$		
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \Psi > 0$	0	$0 > \Psi > -1$	-1
Fator encurvadura k_τ	0,43	$0,578 / (\Psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \Psi + 17,1 \Psi^2$	23,8

Para reforços de extremidade, o cálculo da largura efetiva é semelhante ao apresentado anteriormente, residindo a principal diferença no valor do fator de encurvadura k_σ , o qual é dado por (EN1993-1-3: 5.5.3.2 (5)):

$$k_\sigma = \begin{cases} 0,5 & \text{se } c/b \leq 0,35 \\ 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{c}{b} - 0,35\right)^2} & \text{se } 0,35 < \frac{c}{b} \leq 0,60 \end{cases} \quad (3.59)$$

Tabela 3.6 – Elementos comprimidos externos [1].

Máxima compressão no bordo livre longitudinal		
Distribuição de tensões	Largura e espessura efetiva	Fator de encurvadura
	$1 > \Psi \geq 0$ $b_{e0} = 0,42 b_p$ $t_{eff} = (1,75\rho - 0,75) t$	$1 > \Psi \geq -2$ $k_\sigma = \frac{1,7}{3 + \Psi}$
		$-2 > \Psi \geq -3$ $k_\sigma = 3,3(1 + \Psi) + 1,25\Psi^2$
	$\Psi < 0$ $b_{e0} = \frac{0,42 b_p}{(1 - \Psi)} + b_t < b_p$ $b_t = \frac{\Psi b_p}{(\Psi - 1)}$ $t_{eff} = (1,75\rho - 0,75 - 0,15\Psi)t$	$\Psi < -3$ $k_\sigma = 0,29 (1 - \Psi)^2$
Mínima compressão no bordo livre longitudinal		
Distribuição de tensões	Largura e espessura efetiva	Fator de encurvadura
	$1 > \Psi \geq 0$ $b_{e0} = 0,42 b_p$ $t_{eff} = (1,75\rho - 0,75) t$	$1 > \Psi \geq 0$ $k_\sigma = \frac{1,7}{1 + 3\Psi}$
	$\Psi < 0$ $b_{e0} = \frac{0,42 b_p}{(1 - \Psi)} + b_t < b_p$ $b_t = \frac{\Psi b_p}{(\Psi - 1)}$ $t_{eff} = (1,75\rho - 0,75 - 0,15\Psi)t$	$0 > \Psi \geq -1$ $k_\sigma = 1,7 - 5\Psi + 17,1\Psi^2$
		$\Psi < -1$ $k_\sigma = 5,98 (1 - \Psi)^2$





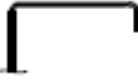
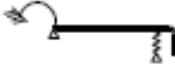









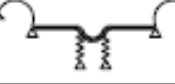




A tabela anterior, fornecida pelo anexo D do EN 1993-1-3, fornece uma alternativa ao método das larguras efetivas para elementos exteriores comprimidos. A área efetiva é assim composta por uma zona do comprimento efetivo do elemento com a espessura inicial e outra zona com uma espessura efetiva, t_{eff} .

3.4. Encurvadura distorcional

A instabilidade distorcional está diretamente relacionada com a presença de reforços, como foi referido anteriormente, e o procedimento de cálculo neste tipo de instabilidade é semelhante ao da encurvadura local, pois envolve também o cálculo de larguras efetivas. A principal diferença entre as verificações destes dois tipos de instabilidade consiste na análise de reforços comprimidos (neste trabalho irão apenas ser analisados reforços de extremidade): no caso da instabilidade local apenas se procede ao cálculo da largura efetiva e na instabilidade distorcional procede-se também ao cálculo da espessura efetiva da zona de ligação banzo-reforço.

O dimensionamento de elementos de reforço baseia-se na hipótese de que o reforço funciona como uma viga sobre uma fundação elástica. A elasticidade da fundação é simulada por molas, cuja rigidez depende da rigidez de flexão dos elementos adjacentes e das condições de fronteira. Na Tabela 3.7 podem observar-se tipos básicos de elementos com sistemas de mola, necessários para modelar numericamente o problema.

Tabela 3.7 – Diferentes modelos com sistemas de mola [1].

Type of element	Model	Type of element	Model
			
			
			
			
			

A rigidez de uma mola equivalente a um reforço deve ser determinada aplicando uma carga unitária por unidade de comprimento. Essa carga provoca um deslocamento do elemento no ponto onde a mesma é aplicada. A rigidez K da mola depende assim da força aplicada e do correspondente deslocamento, ou seja:

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (3.60)$$

em que:

- u é a carga unitária aplicada;
- δ é o deslocamento do reforço devido à carga u aplicada a uma determinada distância do apoio (b_1) na parte efectiva da secção transversal;

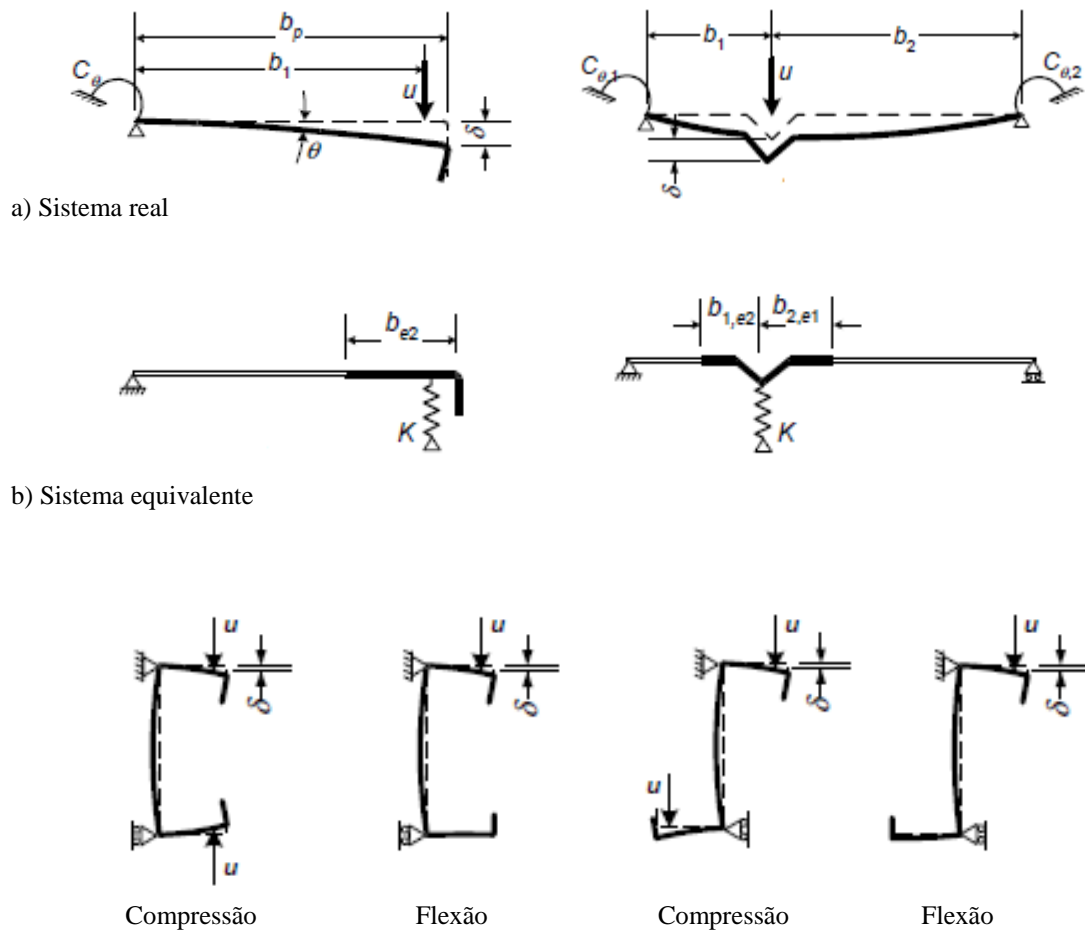


Figura 3.6 – Determinação da rigidez de molas equivalentes a reforços [1].

O deslocamento δ pode ser obtido através da seguinte expressão [1]:

$$\delta = \theta \cdot b_p + \frac{u \cdot b_p^3}{3} \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t^3} \quad (3.61)$$

onde

$$\theta = \frac{u \cdot b_p}{C_\theta} \quad (3.62)$$

onde C_θ é a rigidez da mola rotacional e pode ser calculada tendo em conta a rotação na extremidade de uma barra devido à aplicação de um esforço (momento fletor)

Para determinar o coeficiente C_θ devendo ser tidos em conta possíveis efeitos de outros reforços que existam no mesmo elemento ou em qualquer outro elemento da secção transversal sujeito à compressão.

Para secções transversais em forma de C ou de Z, a rigidez das molas é determinada do seguinte modo:

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \quad (3.63)$$

em que:

- h_w é a altura da alma;
- k_f é a relação entre as áreas efetivas dos banzos, podendo assumir os seguintes valores:

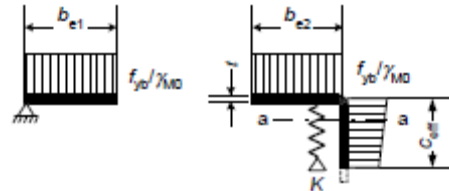
$k_f = 0$, para flexão em torno de um eixo perpendicular à alma;

$k_f = 1$, para uma secção simétrica comprimida;

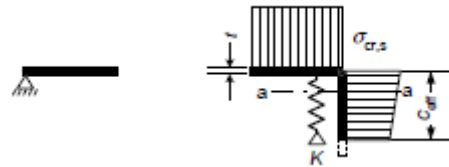
$k_f = A_{eff2}/A_{eff1}$, para flexão ou compressão em torno de um eixo paralelo à alma;

De seguida, apresentam-se os passos a efetuar para definição das larguras efetivas e das respetivas espessuras efetivas.

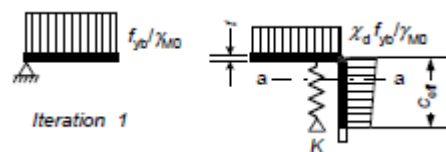
1º Passo – Para uma determinada parcela de uma secção transversal bruta constituída pelo banzo e reforço de extremidade e considerando as respetivas condições de apoio, determina-se a secção efetiva, com $K=\infty$ e $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$.



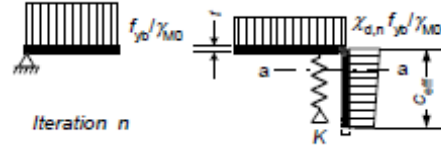
2º Passo – Cálculo da tensão crítica $\sigma_{cr,s}$ e da rigidez da mola correspondente à secção efetiva do reforço determinada no passo anterior.



3º Passo – Cálculo do coeficiente de redução para a instabilidade distorcional, χ_d , baseado na tensão crítica e na conseqüente tensão reduzida, $\chi_d \cdot f_{yb}/\gamma_{M0}$, da área efectiva do reforço.



4º Passo – Repetir sucessivamente os 3 primeiros passos, calculando a espessura reduzida através da tensão reduzida $\chi_d \cdot f_{yb}/\gamma_{M0}$ utilizando o coeficiente de redução χ_d da iteração anterior, até que $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$.



5º Passo – Cálculo da espessura reduzida final, correspondente ao valor $\chi_{d,n}$, determinando-se em seguida as características da secção efetiva final.

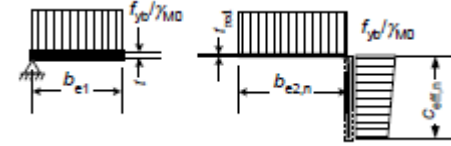


Figura 3.7 – Sequência de passos para determinação da secção efetiva, largura e espessura, para a instabilidade distorcional [1].

A espessura efetiva é obtida através do coeficiente de redução da espessura do reforço, χ_d :

$$t_{eff} = \chi_d \cdot t \quad (3.64)$$

O coeficiente de redução χ_d pode assumir os seguintes valores:

$$\bullet \quad \chi_d = 1 \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (3.65)$$

$$\bullet \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad \text{se} \quad 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (3.66)$$

$$\bullet \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{se} \quad \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (3.67)$$

onde $\bar{\lambda}_d$ é a esbelteza relativa, definida por $\sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$.

A tensão elástica crítica de encurvadura $\sigma_{cr,s}$ de um reforço pode ser obtida a partir de:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KE \cdot I_s}}{A_s} \quad (3.68)$$

em que:

- K_s é a rigidez da mola equivalente ao reforço;
- I_s é o momento de inércia do reforço em torno do eixo y-y;
- A_s é a área do reforço;

3.5. Verificações de segurança

3.5.1. Resistência de secções

A verificação de segurança relativamente à resistência de secções está directamente relacionada com as características da secção transversal. São comparados os esforços actuantes com a capacidade resistente da secção. Esta capacidade depende de propriedades geométricas da secção, como a sua área e momentos de inércia, e ainda da tensão de cedência do material. De seguida apresentam-se as verificações de segurança face a vários tipos de esforços actuantes, de acordo com a EN1993-1-3.

3.5.1.1. Esforço axial de tração

O esforço axial de tração resistente da secção é dado por:

$$N_{t,Rd} = \frac{f_{ya} A_g}{\gamma_{M0}} \quad (3.69)$$

em que:

- f_{ya} é a tensão de cedência média (ver 3.1.3);
- A_g é a área bruta da secção transversal (pois quando uma secção está sujeita a um esforço de tração, toda a sua área é efetiva);
- γ_{M0} é o coeficiente parcial de segurança relativo à resistência das secções (ver 3.1.3).

Nota: O esforço axial resistente pode ainda ser dado por $F_{n,Rd}$, isto é, a resistência última da secção com furos, caso esta seja inferior a $N_{t,Rd}$. Contudo, neste trabalho a hipótese acima não é considerada, não se analisando a resistência das zonas de ligação entre peças.

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.70)$$

em que:

- N_{Ed} é o esforço axial atuante na secção;

3.5.1.2. Esforço axial de compressão

O esforço axial de compressão resistente da secção pode ser obtido por duas formas, dependendo do correspondente valor da área efetiva.

- Se $A_{eff,c} < A_g$, então:

$$N_{c,Rd} = \frac{f_{yb} A_{eff,c}}{\gamma_{Mo}} \quad (3.71)$$

em que:

- f_{yb} é a tensão de cedência base (ver 3.1.3);
- $A_{eff,c}$ é a área efetiva da secção quando sujeita ao esforço de compressão;

- Se $A_{eff,c} = A_g$, então:

$$N_{c,Rd} = \frac{(f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb})4\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{el}}\right)) A_g}{\gamma_{Mo}} \quad (3.72)$$

em que:

- Onde λ é a esbelteza relativa e λ_{el} é a esbelteza limite;
- Para elementos não reforçados, $\lambda = \bar{\lambda}_p$ (quando estes são interiores $\lambda_{el}=0,673$, e quando são exteriores $\lambda_{el}=0,748$). Para elementos reforçados, $\lambda = \bar{\lambda}_d$ e $\lambda_{el}=0,650$.

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.73)$$

3.5.1.3. Momento fletor /flexão simples

Tal como para o esforço axial de compressão resistente, o momento fletor resistente pode também ser obtido por duas formas, dependendo do valor do módulo de flexão efetivo.

- Se $W_{eff} < W_{el}$, então:

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{yb} W_{eff}}{\gamma_{Mo}} \quad (3.74)$$

em que:

- f_{yb} é a tensão de cedência base (ver 3.1.3);
- W_{eff} é o módulo de flexão efetivo da secção quando sujeita ao momento fletor (podendo ser em y ou z e positivo ou negativo, de acordo com o sinal e a direcção do momento atuante);

- Se $W_{eff} = W_{el}$, então:

$$M_{c,Rd} = \frac{(W_{el} + (W_{pl} - W_{el})4\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{el}}\right)) f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.75)$$

em que:

- Para elementos não reforçados, $\lambda = \bar{\lambda}_p$ (quando estes são interiores, $\lambda_{el} = 0,673$, e quando são exteriores, $\lambda_{el} = 0,748$). Para elementos reforçados, $\lambda = \bar{\lambda}_d$ e $\lambda_{el} = 0,650$. Para elementos duplamente suportados (alma) $\lambda = \bar{\lambda}_p$ e $\lambda_{el} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \Psi)}$, onde Ψ é o rácio das tensões nas extremidades da alma;
- W_{el} é o módulo elástico de flexão da secção;
- W_{pl} é o módulo plástico de flexão da secção;

Nota: A expressão acima só se aplica caso sejam satisfeitas as seguintes condições:

- O momento fletor esteja aplicado segundo um dos eixos principais de inércia da secção transversal;
- A barra não esteja sujeita à torção ou a instabilidades por torção, flexão-torção ou distorcionais;
- O ângulo entre a alma e os banzos seja superior a 60°.

Caso estas condições não sejam satisfeitas, a expressão acima deve ser substituída por:

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{ya} W_{el}}{\gamma_{M0}} \quad (3.76)$$

O parâmetro W_{eff} , módulo de flexão efetivo, é referido à secção transversal efetiva sujeita a um momento fletor em torno do eixo principal. Este módulo é dado pela relação entre o momento de inércia respetivo e a fibra mais afastada do eixo (a mais solicitada).

Para uma secção sujeita a um momento fletor em torno de um eixo principal, u e v, tem-se (os eixos u e v são os eixos principais de inércia, centrados no centro de gravidade):

- Em relação ao eixo u:

$$W_{u,vmin} = \frac{I_u}{v_{min}} \quad (3.77)$$

$$W_{u,vmax} = \frac{I_u}{v_{max}} \quad (3.78)$$

- Em relação ao eixo v:

$$W_{v,umin} = \frac{I_v}{u_{min}} \quad (3.79)$$

$$W_{v,umax} = \frac{I_v}{u_{max}} \quad (3.80)$$

em que:

- I_u e I_v são, respetivamente, os momentos de inércia efetivos em torno dos eixos principais de inércia u e v;

- u_{min} e u_{max} são, respetivamente, a coordenada da fibra extrema com menor valor de u e a coordenada da fibra extrema com maior valor de u, em relação ao centro de gravidade;

- v_{min} e v_{max} são, respetivamente, a coordenada da fibra extrema com menor valor de v e a coordenada da fibra extrema com maior valor de v, em relação ao centro de gravidade;

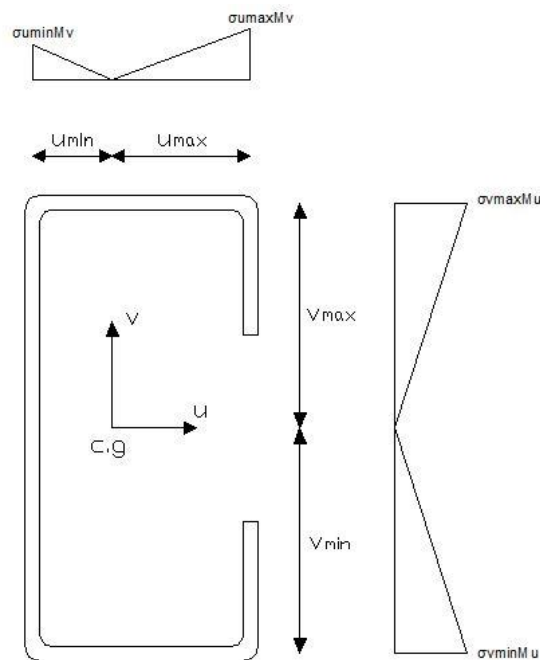


Figura 3.8 – Distância das fibras extremas ao centro de gravidade e distribuição de tensões.

O módulo de flexão efetivo deve ser calculado para a área efetiva tendo em conta as instabilidades local e distorcional. No entanto, como a área efetiva relativa à instabilidade distorcional é menor (pois este modo tem em conta os efeitos locais (larguras efetivas) e os distorcionais (espessuras efetivas)) devido às espessuras efetivas, basta calcular o módulo para este tipo de instabilidade.

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|M_{Ed,i}|}{M_{c,Rd,i}} \leq 1,0 \quad (3.81)$$

em que:

- $M_{Ed,i}$ é o momento atuante (positivo ou negativo) segundo cada um dos eixos;
- $M_{c,Rd,i}$ é o momento resistente da secção em relação a um momento atuante (positivo ou negativo) segundo cada um dos eixos;

3.5.1.4. Esforço transversal

O esforço transversal resistente é dado por:

$$V_{b,Rd} = \frac{h_w}{\sin\theta} \frac{f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.82)$$

em que:

- h_w é a altura da alma medida entre as linhas médias dos banzos;
- f_{bv} é a tensão resistente ao esforço transversal, tendo em conta a influência da encurvadura por corte;
- Φ é o ângulo entre a alma e os banzos.

Tabela 3.8 – Tensão resistente ao esforço transversal em função da esbelteza [1].

Esbelteza relativa da alma	Tensão Resistente	
	Alma sem reforço dos apoios	Alma com reforço dos apoios
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

A esbelteza relativa da alma é obtida da seguinte forma:

- Para almas sem reforços longitudinais:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (3.83)$$

- Para almas com reforços longitudinais:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34}{k_t} \frac{f_{yb}}{E}} \geq 0,346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (3.84)$$

com:

$$k_t = 5,34 + \frac{2,10}{t} \left(\frac{\sum I_s}{s_d} \right)^{1/3} \quad (3.85)$$

em que:

- I_s é o momento de inércia do reforço longitudinal individual em relação ao eixo a-a (ver Figura 3.9);
- s_d é o comprimento total da linha média da alma;
- s_p é o comprimento do maior elemento plano da alma;
- s_w é o comprimento da alma entre os pontos centrais dos cantos da secção.

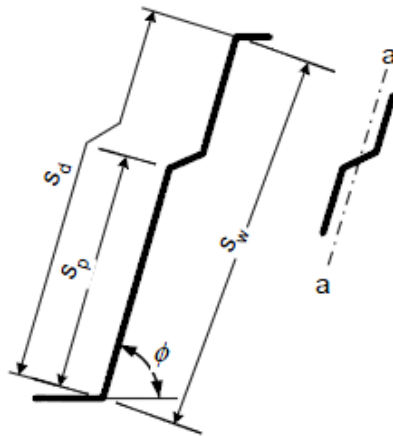


Figura 3.9 – Alma reforçada longitudinalmente [1].

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|V_{Ed}|}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.86)$$

em que:

- V_{Ed} é o esforço transversal atuante;

3.5.1.5. Forças concentradas

Os elementos enformados a frio podem ser bastante susceptíveis a forças transversais concentradas, podendo nessas condições ocorrer o esmagamento da alma. De modo a verificar a segurança em relação ao esmagamento da alma é necessário que a seguinte condição seja satisfeita:

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.87)$$

em que:

- F_{Ed} é a força concentrada atuante;
- $R_{w,Rd}$ é a força concentrada resistente.

O Eurocódigo 3 define três formas distintas de se obter a força concentrada resistente:

- Para secções transversais com uma única alma não reforçada;

- Para secções transversais com duas ou mais almas não reforçadas;
- Para secções transversais com alma reforçada.

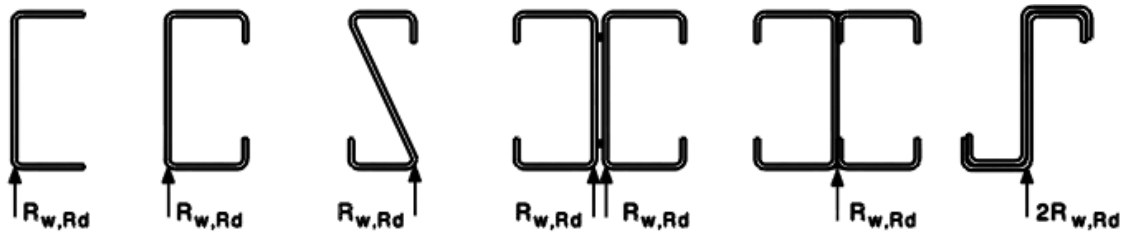


Figura 3.10 – Exemplos de secções transversais com uma única alma [1].

Tendo em conta que neste trabalho serão apenas analisadas secções transversais em C, não reforçadas na alma, aborda-se aqui apenas o cálculo da força concentrada resistente para este tipo de secção.

Secção transversal com uma única alma não reforçada

Para este tipo de secção, a força concentrada resistente da alma pode ser determinada segundo as expressões que se encontram nas Tabelas 3.9 e 3.10 desde que se verifiquem as seguintes condições:

$$h_w/t \leq 200$$

$$r/t \leq 6$$

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

em que:

- r é o raio interno dos cantos;
- ϕ é o ângulo entre a alma e os banzos;

Os valores das constantes presentes nas Tabelas 3.9 e 3.10 são determinados da seguinte forma:

$$k_1 = 1,33 - 0,33k \quad (3.88)$$

$$k_2 = 1,15 - 0,15 r/t \text{ com } 1,0 \geq k_2 \geq 0,50 \quad (3.89)$$

$$k_3 = 0,7 + 0,3(\phi/90)^2 \quad (3.90)$$

$$k_4 = 1,22 - 0,22k \quad (3.91)$$

$$k_5 = 1,06 - 0,06 r/t \text{ com } k_5 \leq 1,0 \quad (3.92)$$

em que:

- k é um coeficiente adimensional dado por $f_{yb}/228$;
- s_s é a largura real do apoio.

Tabela 3.9 – Seções transversais com uma única alma – uma única carga ou reação de apoio [1].

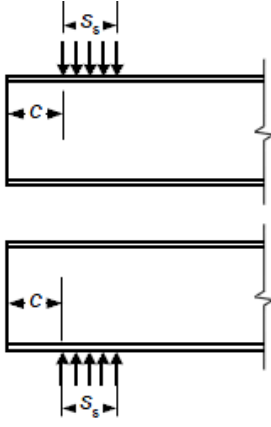
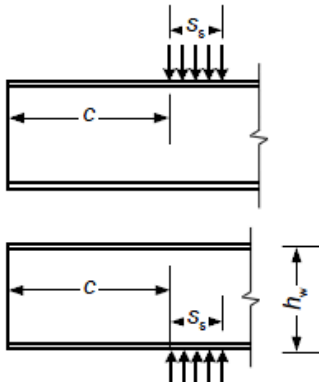
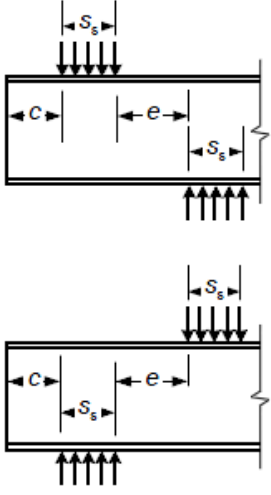
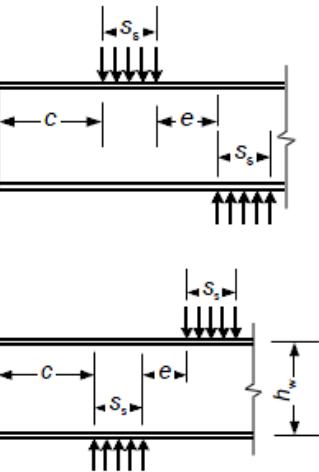
a) Para uma única carga concentrada ou reação de apoio	
a.1) $c \leq 1,5 h_w$ - distância da carga à extremidade livre	
	<ul style="list-style-type: none"> Seção transversal com banzos reforçados $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[9,04 - \frac{h_w/t}{60} \right] \left[1 + 0,01 \frac{S_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.93)$ <ul style="list-style-type: none"> Seção transversal sem banzos reforçados <p>- $s_s/t \leq 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[1 + 0,01 \frac{S_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.94)$ <p>- $s_s/t > 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[0,71 + 0,015 \frac{S_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.95)$
a.2) $c > 1,5 h_w$ - distância da carga à extremidade livre	
	<p>- $s_s/t \leq 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[1 + 0,007 \frac{S_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.96)$ <p>- $s_s/t > 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[0,75 + 0,007 \frac{S_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.97)$

Tabela 3.10 – Secções transversais com uma única alma – Duas cargas opostas com afastamento inferior a $1,5 h_w$ [1].

b) Para duas cargas concentradas opostas com afastamento inferior a $1,5 h_w$	
	<p>- $c \leq 1,5 h_w$ - distância da carga à extremidade livre</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[6,66 - \frac{h_w/t}{64} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.98)$
	<p>- $c > 1,5 h_w$ - distância da carga à extremidade livre</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[21,0 - \frac{h_w/t}{16,3} \right] \left[1 + 0,0013 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.99)$

Em almas não suscetíveis à rotação devido a alguma restrição ou ao tipo de geometria da secção, a força concentrada resistente da alma é determinada da seguinte forma:

a) Para uma única carga concentrada ou reação de apoio

a.1) $c \leq 1,5 h_w$

Para uma secção transversal com banzos reforçados ou não reforçados:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_7 \left[8,8 + 1,1 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.100)$$

a.2) $c > 1,5 h_w$

Para uma secção transversal com banzos reforçados ou não reforçados:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_5^* k_6 \left[13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.101)$$

b) Para duas cargas concentradas opostas

b.1) $c \leq 1,5 h_w$

Para uma secção transversal com banzos reforçados ou não reforçados:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_{10} k_{11} \left[8,8 + 1,1 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.102)$$

b.2) $c > 1,5 h_w$

Para uma secção transversal com banzos reforçados ou não reforçados:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_8 k_9 \left[13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.103)$$

Os valores das constantes das expressões acima são determinados da seguinte forma:

$$k_5^* = 1,49 - 0,53k, \text{ com } k_5^* \geq 0,6 \quad (3.104)$$

$$k_6 = 0,88 - 0,12 t/1,9 \quad (3.105)$$

$$k_7 = 1 + s_s/t/750 \text{ com } s_s/t < 150; \quad k_7 = 1,20 \text{ com } s_s/t > 150 \quad (3.106)$$

$$k_8 = 1/k \text{ com } s_s/t < 66,5; \quad k_8 = (1,10 - s_s/t/665)/k \text{ com } s_s/t > 66,5 \quad (3.107)$$

$$k_9 = 0,82 + 0,15 t/1,9 \quad (3.108)$$

$$k_{10} = (0,98 - s_s/t/865)/k \quad (3.109)$$

$$k_{11} = 0,64 + 0,31 t/1,9 \quad (3.110)$$

em que:

- k é um coeficiente adimensional dado por $f_{yb}/228$.

3.5.1.6. Flexão desviada

Quando na secção transversal atuam momentos segundo dois eixos, é necessário efetuar a verificação à flexão desviada. Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser satisfeita aquando do dimensionamento:

$$\frac{|M_{Ed,u}|}{M_{c,Rd,u}} + \frac{|M_{Ed,v}|}{M_{c,Rd,v}} \leq 1,0 \quad (3.111)$$

em que:

- $M_{Ed,u}$ é o momento atuante (positivo ou negativo) segundo o eixo u;
- $M_{Ed,v}$ é o momento atuante (positivo ou negativo) segundo o eixo v;
- $M_{c,Rd,u}$ é o momento resistente da secção segundo o eixo u;
- $M_{c,Rd,v}$ é o momento resistente da secção segundo o eixo v;

3.5.1.7. Flexão desviada composta com tração

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|M_{Ed,u}|}{M_{c,Rd,u}} + \frac{|M_{Ed,v}|}{M_{c,Rd,v}} + N_{Nt} \leq 1,0 \quad (3.112)$$

3.5.1.8. Flexão desviada composta com compressão

Segundo o Artigo 6.2.4.(4) da EN1993-1-1, para secções assimétricas de Classe 4, deverão ter-se em consideração momentos adicionais atuantes $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_N$, devidos ao afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetivas e bruta.

Segundo o Artigo 6.1.3.(3) da EN1993-1-3 se a excentricidade e_N provocar um efeito favorável ao momento adicional, ou seja, se ΔM_{Ed} tiver sinal contrário a M_{Ed} , então ΔM_{Ed} deverá ser desprezado nas verificações de segurança, caso a excentricidade seja calculada utilizando a tensão de cedência.

As componentes de e_N segundo os eixos u e v são dadas por:

$$e_{Nu} = v_{cg,eff} - v_{cg} \quad (3.113)$$

$$e_{Nv} = u_{cg,eff} - u_{cg} \quad (3.114)$$

O momento adicional é dado por:

$$\Delta M_{Edu} = e_{Nu} \cdot |N_{Ed}| \quad (3.115)$$

$$\Delta M_{Edv} = e_{Nv} \cdot |N_{Ed}| \quad (3.116)$$

Para que a segurança seja verificada, as seguintes condições devem ser verificadas aquando do dimensionamento:

$$\frac{|M_{Ed,u} + \Delta M_{Edu}|}{M_{c,Rd,u}} + \frac{|M_{Ed,v} + \Delta M_{Edv}|}{M_{c,Rd,v}} + N_{Nc} \leq 1,0 \quad (3.117)$$

3.5.1.9. Flexão desviada composta e esforço transversal

Em secções transversais sujeitas à ação combinada conjunta do esforço axial, momento fletor e esforço transversal, nenhuma redução devido a esta última necessita ser feita caso metade do esforço transversal resistente seja superior ao esforço transversal atuante. Caso tal não se verifique a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{|V_{Ed}|}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1,0 \quad (3.118)$$

em que:

- N_{Rd} é o esforço axial resistente de compressão ou tração;
- $M_{y,Rd}$ é o momento fletor resistente da secção segundo y ;
- $M_{f,Rd}$ é o momento plástico resistente de uma secção composta unicamente pelos banzos;

$$M_{f,Rd} = \frac{A_f(h_w + t_f)f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.119)$$

- A_f e t_f são, respetivamente, a área e a espessura dos banzos.

- $M_{pl,Rd}$ é o momento plástico resistente da secção transversal. Como o momento plástico é utilizado para secções da Classe 1 ou 2, admite-se a substituição do momento plástico pelo momento resistente, $M_{c,Rd}$, o qual tem de ser maior que $M_{f,Rd}$. Caso não o seja, admite-se que a parcela $\left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)(2V_{Nt} - 1)^2$ é nula;
- $V_{w,Rd}$ é a resistência ao esforço transverso da alma ($A_w \times t_w \times \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)$).

3.5.1.10. Flexão simples e força concentrada

Para que a segurança seja assegurada, a seguinte condição deve ser assegurada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25 \quad (3.120)$$

3.5.2. Resistência à encurvadura global

A encurvadura é um fenómeno que ocorre frequentemente em elementos esbeltos, sendo muitas vezes o motivo do colapso desses elementos. Em elementos cuja secção transversal é susceptível à distorção, deve ser tida em conta a possibilidade de ocorrer encurvadura lateral em banzos comprimidos. Assim, é necessário verificar se a secção transversal consegue resistir aos diferentes modos de encurvadura.

A obtenção dos esforços críticos é muito importante para a determinação dos esforços resistentes à encurvadura global. Existem dois modos de instabilidade, um por flexão e outro por torção/torção-flexão, que fornecem diferentes esforços críticos, devendo ambos ser comparados para se saber qual o mais condicionante.

3.5.2.1. Esforço axial de compressão

3.5.2.1.1. Esbelteza para a encurvadura por flexão

Segundo o Artigo 6.3.1.3.(1) da EN1993-1-1, existem duas formas de calcular a esbelteza normalizada dos perfis, dependendo da classe das secções transversais. Como já foi visto, grande parte dos perfis enformados a frio são de Classe 4, devido à sua elevada esbelteza; logo, a esbelteza normalizada é calculada da seguinte forma:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}/A}}{\lambda_1} \quad (3.121)$$

em que:

- $\bar{\lambda}_i$ é a esbelteza normalizada segundo o eixo u ou v, variando os parâmetros da equação em função do eixo que se está a analisar;
- L_{cr} é o comprimento de encurvadura no plano considerado, o qual depende das condições de apoio da barra.
- i é o raio de giração em torno do eixo considerado, o qual depende das propriedades da secção e obtém-se da seguinte forma:

$$i = \sqrt{I/A} \quad (3.122)$$

λ_1 é uma constante dada por:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y} \quad (3.123)$$

• Comprimento de encurvadura

O comprimento de encurvadura L_{cr} , é definido como o comprimento fictício entre pontos de inflexão da deformada associada ao tipo de carregamento e condições de apoio da barra. O comprimento de encurvadura pode ser calculado de formas diferentes, dependendo do tipo de elementos.

• Para elementos isolados

Em elementos isolados, o cálculo de L_{cr} é imediato, bastando analisar a configuração deformada da barra. Como se pode ver na imagem abaixo, $L_{cr} = k.L$ em que L é o comprimento da barra e k é um coeficiente dado pela distância entre pontos de inflexão.

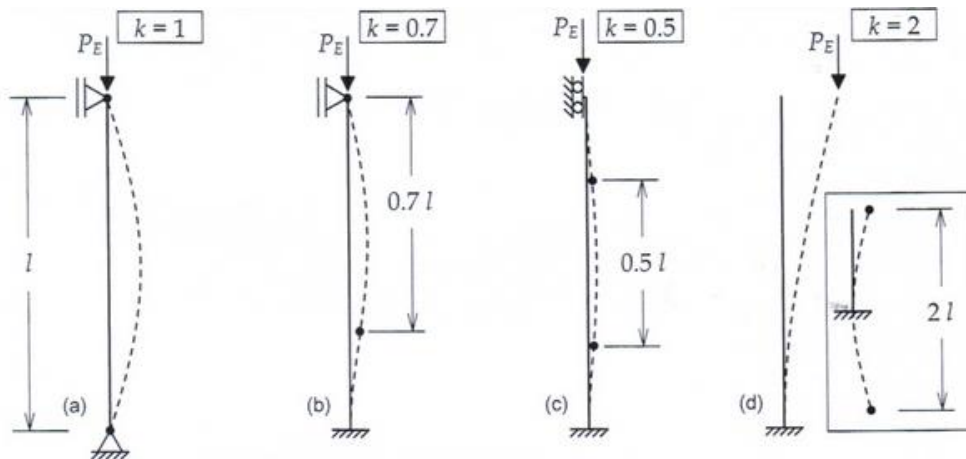


Figura 3.11 – Deformadas de barras sujeitas à compressão, com diferentes condições de apoio [32].

- Para elementos agrupados ou pórticos

A análise da estabilidade destes elementos é mais complexa, pois há que considerar a rigidez da ligação das vigas às colunas (k) e a possibilidade da estrutura apresentar ou não deslocamentos laterais. Estruturas sem deslocamentos laterais normalmente apresentam cargas de encurvadura mais elevadas, enquanto que estruturas com deslocamentos laterais apresentam cargas de encurvadura mais reduzidas.

Os fatores de distribuição de rigidez nos nós são dados por:

$$\eta_1 = \frac{k_c + k_1}{k_c + k_1 + k_{11} + k_{12}} \quad (3.124)$$

$$\eta_2 = \frac{k_c + k_2}{k_c + k_2 + k_{21} + k_{22}} \quad (3.125)$$

em que:

- $k_c = I_c/L_c$ é o coeficiente de rigidez de flexão da coluna central;
- $k_i = I_i/L_i$ é o coeficiente de rigidez de flexão das colunas adjacentes;
- $k_{ij} = I_{ij}/L_{ij}$ é o coeficiente de rigidez efetiva de flexão das vigas adjacentes. Pode ser obtido da tabela 3.11, dependendo das correspondentes restrições à rotação.

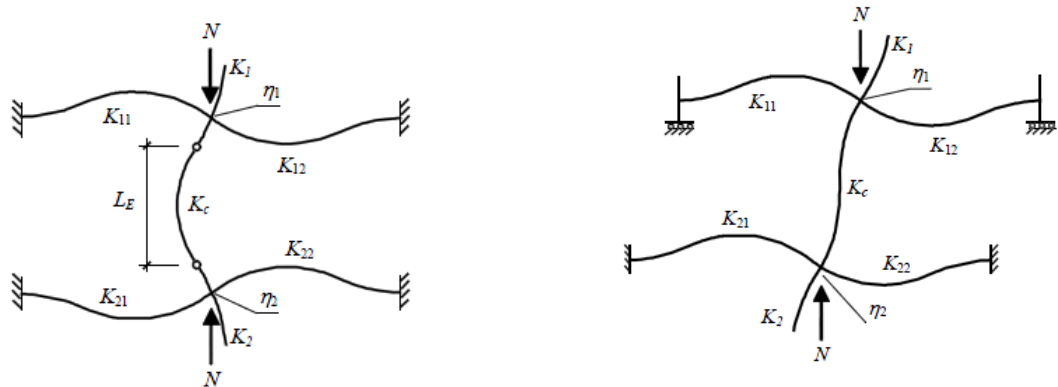


Figura 3.12 – Fatores de distribuição para colunas com continuidade (modo sem deslocamentos laterais – imagem da esquerda; modo com deslocamentos laterais – imagem da direita).

Tabela 3.11 – Coeficientes de rigidez efetiva para vigas, k_{ij} .

Restrições à rotação na extremidade oposta	Coeficiente k_{ij}
Encastrada	I/L
Rotulada	$0,75 I/L$
Igual rotação (curvatura simples)	$0,5 I/L$
Igual rotação em sentido contrário (curvatura dupla)	$1,5 I/L$
Caso geral (θa : junto ao pilar, θb : extremidade oposta)	$[1+0,5 (\theta a/ \theta b)] I/L$

O comprimento de encurvadura pode ser calculado de modo aproximado, recorrendo a ábacos ou utilizando as expressões abaixo.

- Modo sem deslocamentos laterais

$$k = \frac{L_{cr}}{L} = 0,5 + 0,14 (\eta_1 + \eta_2) + 0,055 (\eta_1 + \eta_2)^2 \quad (3.126)$$

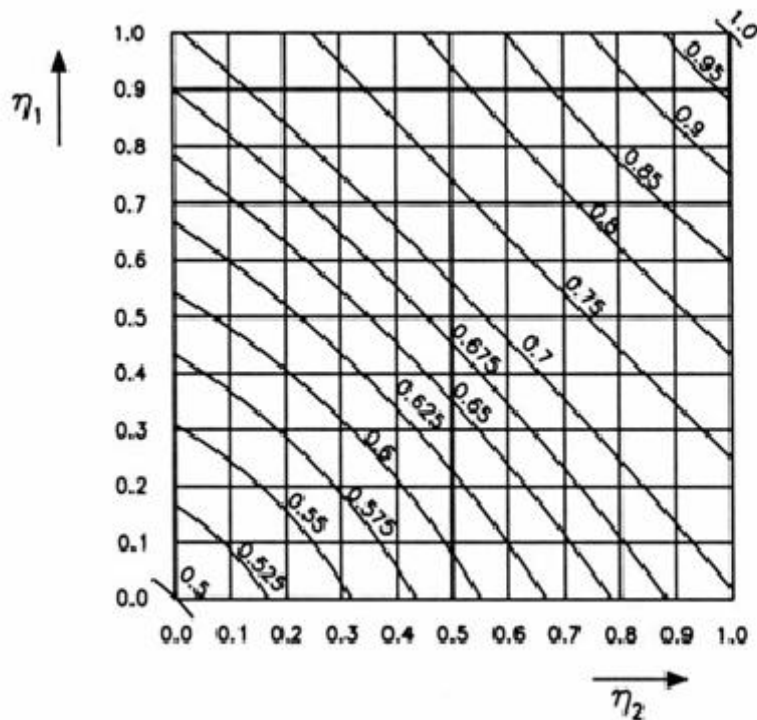


Figura 3.13 – Ábaco para cálculo do comprimento de encurvadura - modo sem deslocamentos laterais.

- Modo com deslocamentos laterais

$$k = \frac{L_{cr}}{L} = \sqrt{\frac{1 - 0,2 (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \eta_1 \eta_2}{1 - 0,8 (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \eta_1 \eta_2}} \quad (3.127)$$

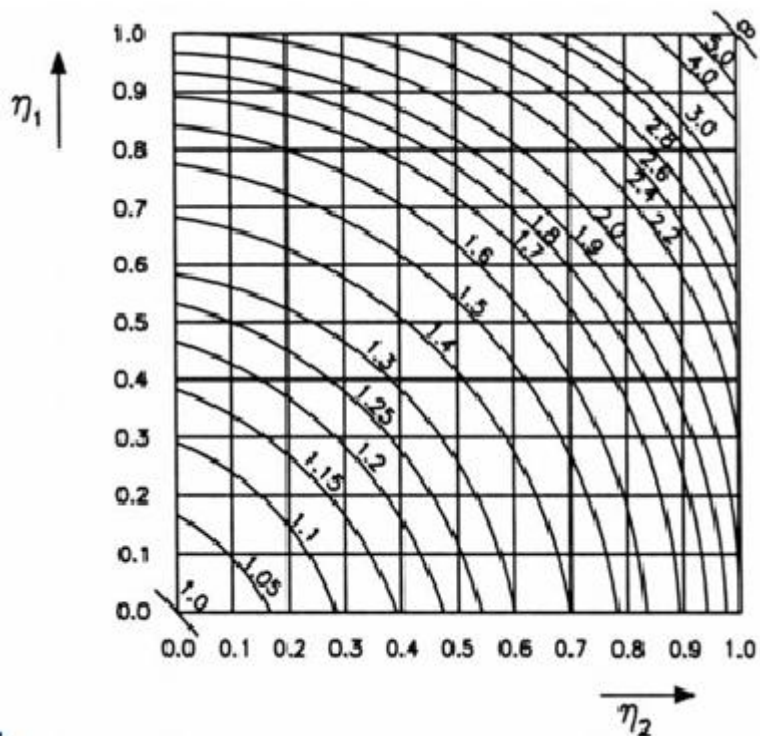


Figura 3.14 – Ábaco para cálculo do comprimento de encurvadura - modo com deslocamentos laterais.

3.5.2.1.2. Esbelteza de encurvadura por torção/torção-flexão

A encurvadura por torção ou por torção-flexão pode ocorrer, pois os elementos enformados a frio com secção aberta apresentam uma baixa rigidez de torção. A ocorrência de encurvadura por torção-flexão depende do tipo de carregamento, da geometria da secção transversal e das condições de apoio da barra. Neste caso, além de existir deformação por flexão existe também deformação por torção.

A esbelteza correspondente a estes modos de encurvadura é obtida a partir das cargas críticas de encurvadura, tal como é mostrado em seguida (Artigo 6.2.3 da EN1993-1-3).

Para elementos de secção transversal, deve ser tida em conta a possibilidade da resistência do elemento à encurvadura por torção-flexão ser menor do que a resistência à encurvadura por flexão.

Carga crítica elástica de encurvadura por torção

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 E \cdot I_w}{L_w^2} \right) \quad (3.128)$$

em que:

- i_0 é o raio de giração polar da secção, que pode ser obtido da seguinte forma:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (3.129)$$

onde:

i_y – raio de giração da secção transversal bruta em relação ao eixo y-y;

i_z – raio de giração da secção transversal bruta em relação ao eixo z-z;

y_0, z_0 – diferença entre as coordenadas do centro de corte e as do centro de gravidade;

- G é o módulo de distorção;
- L_w é o comprimento de encurvadura da barra à encurvadura por torção;
- I_w é a constante de empenamento.

O comprimento de encurvadura L_w para a encurvadura por torção ou torção-flexão deve ser determinado tendo em conta o grau de restrição à torção e ao empenamento nas duas extremidades da barra.

Dependendo da ligação em cada extremidade da barra, L_w/L pode assumir os seguintes valores:

- 1,0 se em ambas as extremidades a restrição à torção e ao empenamento for pouco significativa;
- 0,7 se numa extremidade existir restrição significativa à torção e ao empenamento;
- 0,5 se em ambas as extremidades houver restrição total à torção e ao empenamento.

Carga crítica elástica de encurvadura por torção-flexão

Para secções onde y é o eixo de simetria (secções em C):

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right) \quad (3.130)$$

em que:

- $N_{cr,y}$ é a carga crítica elástica de flexão em torno do eixo y , dada por:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_y^2} \quad (3.131)$$

- β é uma constante de assimetria da secção em relação ao eixo y , dada por:

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \quad (3.132)$$

A partir de $N_{cr,TF}$, calcula-se outra esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{onde } N_{cr} = N_{cr,TF} \leq N_{cr,T} \quad (3.133)$$

Depois de se obter esta esbelteza normalizada, calcula-se o coeficiente de redução de resistência à encurvadura global, que é obtido através de:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_T^2}} \quad (3.134)$$

em que:

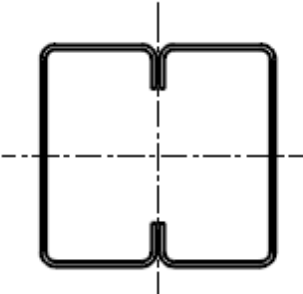
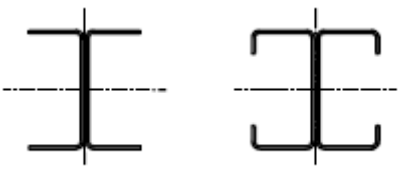
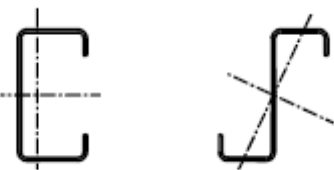
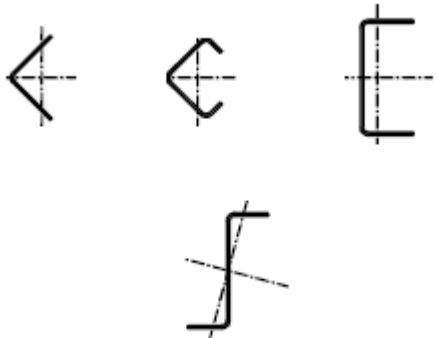
- ϕ é um parâmetro adicional, obtido por:

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_T - 0,2) + \bar{\lambda}_T^2 \right] \quad (3.135)$$

onde α é um fator de imperfeição.

O fator de imperfeição depende da curva de encurvadura, definida no quadro abaixo. Essa curva de encurvadura depende, em secções de aço enformadas a frio, da geometria da secção e do eixo em torno do qual ocorre encurvadura.

Tabela 3.12 – Definição da curva de encurvadura de acordo com o tipo de secção transversal [1].

Tipo de secção transversal		Eixo de encurvadura	Curva de encurvadura
	Se se usar f_{yb}	Qualquer	b
	Se se usar f_{ya}^*	Qualquer	c
		y-y	a
		z-z	b
		Qualquer	b
		Qualquer	c

*A tensão de cedência média f_{ya} não deve ser utilizada, a não ser que $A_{eff} = A_g$.

Tabela 3.13 – Fator de encurvadura correspondente à respetiva curva de encurvadura [3].

Curva de encurvadura	a	b	c
Fator de imperfeição α	0,21	0,34	0,49

O esforço axial resistente, que corresponde à encurvadura por torção ou torção-flexão, da barra é dado por:

$$N_{b,Rbd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.136)$$

em que:

- γ_{M1} é o coeficiente parcial de segurança relativo à encurvadura (ver 3.1.3);

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,Rbd}} \leq 1,0 \quad (3.137)$$

3.5.2.2. Flexão simples

3.5.2.2.1. Encurvadura lateral/torção de elementos sujeitos à flexão

Para verificar a resistência à encurvadura lateral, é necessário calcular o momento crítico do elemento. O cálculo deste valor baseia-se nas propriedades da secção transversal bruta e é relativamente complexo pois depende de vários parâmetros, como as condições de carregamento, a distribuição real dos momentos flectores e os travamentos laterais.

Momento crítico elástico de encurvadura lateral/torção

A expressão geral para o cálculo deste momento é [4]:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} \right]} \quad (3.138)$$

em que:

- I_t é a inércia de torção;
- I_w é a constante de empenamento;
- I_z é a inércia da secção em torno do eixo z (eixo de menor inércia);
- L é o comprimento da barra entre pontos com restrição lateral;

A expressão de M_{cr} indicada atrás, é retirada do Anexo F da EN1993-1-1 de 1992 [4]. É utilizada esta expressão porque o momento de inércia em torno de y é significativamente superior ao momento de inércia em torno de z, ocorrendo a instabilidade para momentos em torno de y. A expressão é utilizada quando o movimento lateral e a torção em relação ao eixo longitudinal estão restringidos. Em secções assimétricas o cálculo torna-se mais complexo, sendo necessário recorrer a programas computacionais.

A partir de M_{cr} , calcula-se a esbelteza normalizada relativa ao modo de instabilidade lateral por flexão-torção:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (3.139)$$

Depois de se obter a esbelteza normalizada calcula-se o coeficiente de redução de resistência devido à encurvadura lateral, que é obtido através de:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \text{ e } \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \quad (3.140)$$

em que:

- ϕ_{LT} é um parâmetro adicional, obtido por:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (3.141)$$

onde α_{LT} é um factor de imperfeição igual a 0,21 para elementos susceptíveis de sofrer encurvadura lateral/torção.

O Artigo 6.3.2.3.(2) da EN1993-1-1 define um coeficiente de redução modificado, $\chi_{LT,mod}$, de modo a ter em conta a distribuição de momentos flectores entre os travamentos laterais da barra:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (3.142)$$


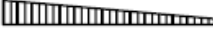






em que:

- χ_{LT} tem que ser menor ou igual que 1,0 e $1/\bar{\lambda}_{LT}^2$;
- f é obtido através de:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) [1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8^2)] \leq 1,0 \quad (3.143)$$

onde k_c é um fator de correcção que tem em conta a distribuição de momentos (ver tabela seguinte).

Tabela 3.14 – Fatores de correccção k_c [3].

<i>Distribuição de momentos</i>	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

O valor de dimensionamento do momento fletor resistente da barra é pois dado por:

$$M_{b,Rbd} = \frac{\chi_{LT} W_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3.144)$$

em que:

- γ_{M1} é o coeficiente parcial de segurança relativo à encurvadura (ver 3.1.3);

Para que a segurança seja verificada, a seguinte condição deve ser verificada aquando do dimensionamento:

$$\frac{|M_{Ed}|}{M_{b,Rbd}} \leq 1,0 \quad (3.145)$$

3.5.2.3. Flexão desviada composta com compressão

A EN1993-1-3 estabelece que a seguinte condição deve ser verificada:

$$\left(\frac{|N_{Ed}|}{N_{b,Rbd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{|M_{Ed,i}|}{M_{b,Rbd,i}}\right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (3.146)$$

em que:

- N_{Ed} é o esforço axial atuante;
- $M_{Ed,i}$ é o momento atuante, podendo ser segundo y ou z;
- $N_{b,Rbd}$ é o valor de esforço axial resistente à encurvadura;
- $M_{b,Rbd,i}$ é o valor de momento resistente à encurvadura;

Alternativamente, a EN1993-1-1 define também equações a verificar em elementos laminados a quente, onde os principais modos de instabilidade global são os de encurvadura por flexão e/ou encurvadura lateral. Em elementos enformados a frio, os problemas de instabilidade por torção e/ou torção-flexão são muito relevantes, como já foi referido antes. Assim, deve adotar-se o menor coeficiente de redução entre o devido à encurvadura por flexão e o devido à encurvadura por torção ou torção-flexão. A equação a verificar é pois a seguinte:

$$\frac{\frac{|N_{Ed}|}{\min(\chi_y, \chi_T) \cdot N_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (3.147)$$

$$\frac{\frac{|N_{Ed}|}{\min(\chi_z, \chi_T) \cdot N_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (3.158)$$

em que:

- k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} são fatores de interação que podem ser obtidos de acordo com os Anexos A ou B da EN1993-1-1.


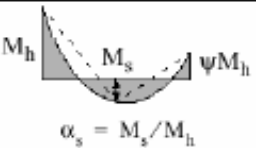
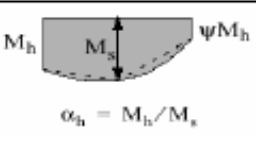
No Anexo B da EN1993-1-1, apresentam-se dois quadros que permitem obter os fatores de interação, consoante os elementos são ou não suscetíveis a deformações por torção. Como os elementos em estudo são suscetíveis de se deformar por torção, os fatores de interação são obtidos através da tabela seguinte.

Tabela 3.15 – Fatores de interação para elementos suscetíveis à deformação por torção [3].

Factores de interação	Tipo de secções	Hipóteses de cálculo	
		Propriedades elásticas das secções transversais	Propriedades plásticas das secções transversais
		Classe 3, Classe 4	Classe 1, Classe 2
k_{yy}	Secções em I Secções ocas rectangulares	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	Secções em I Secções ocas rectangulares	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{xy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ para $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $k_{xy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$		
k_{zz}	Secções em I	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	Secções ocas rectangulares		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Na tabela acima, os parâmetros N_{Rk} correspondem a $N_{c,Rdu}$ e os parâmetros C_m são coeficientes de momento uniforme equivalente, indicados no quadro abaixo, indicado no Anexo B da EN1993-1-1.

Tabela 3.16 – Coeficientes de momento uniforme equivalente [3].

Diagrama de momentos	Domínio		C_{my} e C_{mx} e C_{mLT}	
			Carga uniforme	Carga concentrada
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 - 0,10\alpha_h(1+2\psi)$
Em elementos com modos de encurvadura associados a deslocamentos laterais, o coeficiente de momento uniforme equivalente deverá tomar-se igual a $C_{my} = 0,9$ ou $C_{mx} = 0,9$, respectivamente.				
C_{my} , C_{mx} e C_{mLT} deverão ser obtidos de acordo com o diagrama dos momentos flectores entre os pontos de travamento, da seguinte forma:				
coeficiente de momento	eixo de flexão	travamento na direcção		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mx}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

3.5.2.4. Flexão desviada composta com tração

A EN1993-1-1 é omissa em relação à verificação de segurança de barras submetidas à flexão desviada composta com tração. Assim, é sugerida uma hipótese, semelhante à hipótese proposta por Veríssimo [15], para efetuar esta verificação, a qual consiste em adaptar a expressão de verificação de segurança para a flexão desviada composta com compressão, retirando a parcela do esforço axial (pois a tração não provoca encurvadura) e desprezando também os fatores de interação. Assim, para verificar a segurança, é necessário que a seguinte condição seja satisfeita:

$$\frac{|M_{Ed,y}|}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}{\gamma_{M1}}} + \frac{|M_{Ed,z}|}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.149)$$

4. Análise dos resultados obtidos

O dimensionamento de elementos enformados a frio segundo a EN1993-1-3 é relativamente complexo, pois o cálculo das características efetivas da secção, de acordo com o Método das Larguras Efetivas, envolve processos iterativos algo trabalhosos.

De modo a compreender todo o processo de dimensionamento e adquirir uma melhor noção das relações entre os parâmetros envolvidos, procedeu-se inicialmente, numa folha Excel, ao dimensionamento para uma secção transversal arbitrária, seguindo todos os passos que foram anteriormente apresentados no Capítulo 3.

Para automatizar o processo de dimensionamento, foi necessário utilizar um outro programa. Começou por utilizar-se o WxMaxima, que é uma interface gráfica do sistema algébrico Maxima que permite fazer análises numéricas com relativa facilidade [29], mas depois optou-se pelo Matlab [30], que é um programa mais sofisticado e amplamente utilizado em problemas científicos. Efetivamente, o Matlab é uma ferramenta computacional com uma linguagem de alto desempenho, integrando computação, visualização e programação num ambiente de fácil utilização onde os problemas e as soluções são expressos numa notação matemática familiar. O recurso ao Matlab permitiu fazer variar alguns parâmetros, como a altura da secção e a espessura dos seus elementos, de modo a determinar a gama de valores que verifica a segurança.

Alguns parâmetros foram adotados como pré-definidos, ou seja, não variáveis. Esses parâmetros são os seguintes:

- módulo de elasticidade, $E = 210 \text{ GPa}$;
- módulo de distorção, $G = 81 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,30$;
- Tensão de cedência: $f_{yb} = 350 \text{ MPa}$;
- Tensão última: $f_u = 500 \text{ MPa}$;
- comprimento da barra, $L = 3\text{m}$.

Foram também desde logo pré-definidos outros dados importantes para o dimensionamento, nomeadamente:

- Geometria da secção transversal em C, com reforços de extremidade;
- Raio interno dos cantos da secção transversal igual à espessura dos elementos;
- Secção transversal bruta com dimensões medidas até ao ponto médio das curvas;
- Peça apoiada em ambas as extremidades;

- Alma sem reforços longitudinais;
- Flexão lateral e rotação em relação ao eixo longitudinal restringidos;

De modo a averiguar diferentes soluções de dimensionamento, vários parâmetros foram sendo modificados, tais como:

- Dimensões da secção transversal;
- Esforços atuantes na secção.

Foram efetuadas diversas análises, variando os parâmetros acima. De seguida, procede-se à apresentação, interpretação e discussão dos resultados obtidos.

4.1. Variação da altura da secção transversal

Para levar a cabo esta análise, arbitraram-se os seguintes valores para os esforços atuantes e para as dimensões da secção transversal:

- $N_{Ed} = 10 \text{ kN}$;
- $V_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$;

Para a altura (h), foi definido um vetor com valor mínimo de 70 mm, valor máximo de 300 mm e variação de 10 mm entre valores sucessivos ($h=70, 80, 90, \dots, 290, 300 \text{ mm}$).

Foram escolhidos estes valores de esforços, bastante reduzidos, devido ao facto das secções enformadas a frio apresentarem uma geometria mais esbelta quando comparadas com as secções laminadas a quente, sendo, teoricamente, resistentes a esforços mais reduzidos.

Procedeu-se depois à verificação de resistência da secção, obtendo-se os resultados apresentados nos gráficos seguintes:

Resistência da secção

- Resistência ao esforço axial

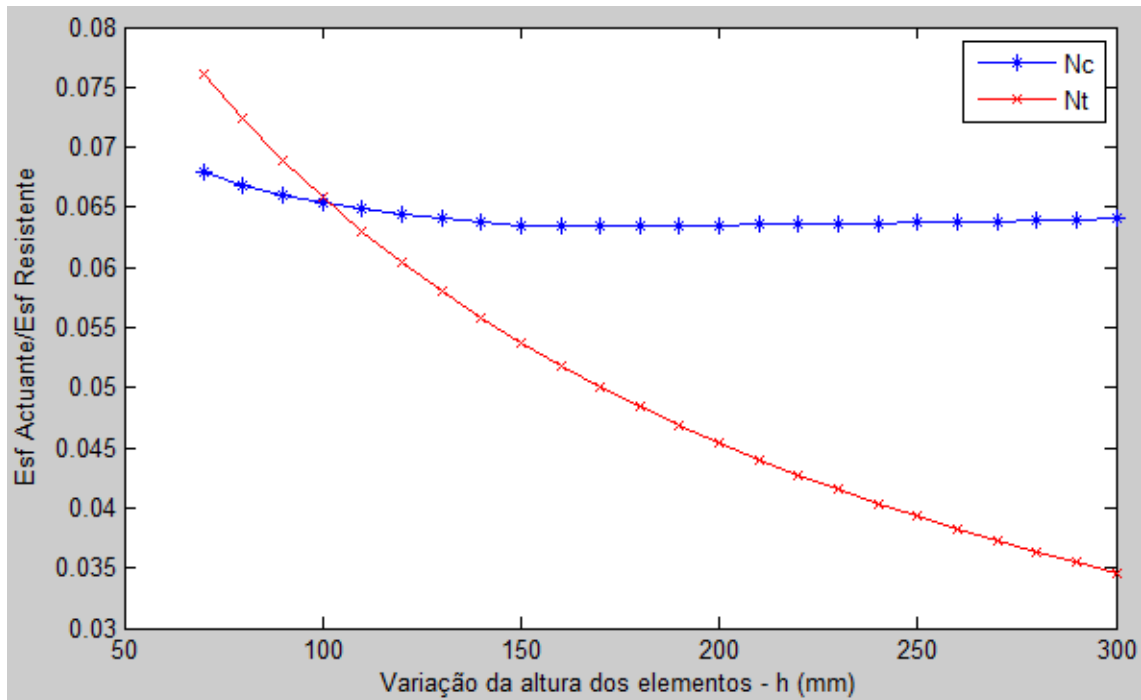


Figura 4.1 – Segurança ao esforço axial de compressão (N_c) e de tração (N_t).

- Resistência ao esforço transversal e forças concentradas

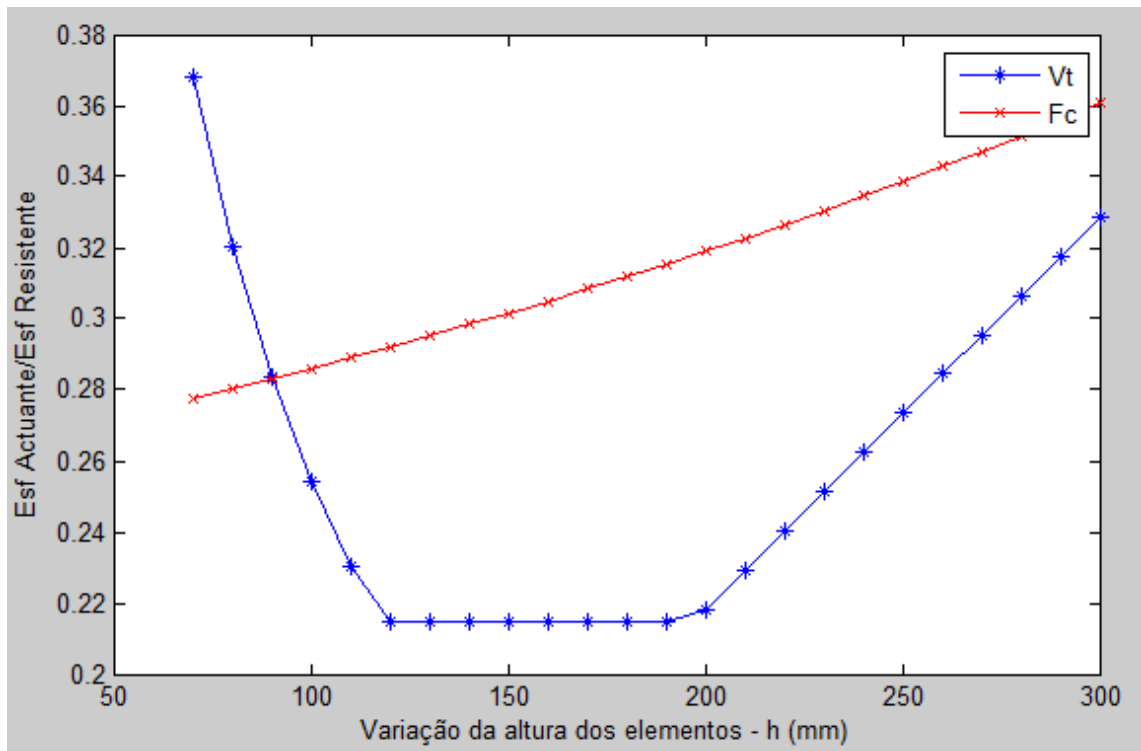


Figura 4.2 - Segurança ao esforço transversal (V_t) e às forças concentradas (F_c).

Observa-se que, para os parâmetros que foram definidos e para a gama de alturas considerada, a segurança é verificada confortavelmente, pois as relações esforço atuante / esforço resistente são bastante menores que 1.

O rácio de resistência ao esforço axial de compressão (N_c) mantém-se praticamente constante (verifica-se um pequeno acréscimo do rácio a partir dos 200mm de altura pois a influência do coeficiente de redução vai diminuindo) pois a variação da área efetiva à compressão não é muito grande, pois à medida que a altura aumenta o coeficiente de redução diminui, o que reduz o acréscimo da área efetiva à medida que a altura aumenta. Relativamente a N_t , tendo em conta que se utiliza a área bruta aproximada e que esta aumenta progressivamente com a altura, o valor da curva diminui mais significativamente à medida que a altura aumenta.

O rácio de segurança ao esforço transversal (V_t) é obtido através da expressão indicada em 3.5.1.4, dependendo pois da altura da alma e da tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} . O valor de f_{bv} , por sua vez, depende da esbelteza relativa da alma, $\bar{\lambda}_w$. Assim, à medida que a altura aumenta, o valor de f_{bv} varia de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 4.1 – Tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} , em função da altura da secção, h .

h (mm)	f_{bv} (MPa)	h (mm)	f_{bv} (MPa)	h (mm)	f_{bv} (MPa)
70	203	160	148,5925	250	74,0767
80	203	170	139,6884	260	68,4216
90	203	180	131,7910	270	63,3901
100	203	190	124,7388	280	58,8939
110	203	200	116,4797	290	54,8597
120	199,4455	210	105,4912	300	51,2262
130	183,7263	220	95,9875		
140	170,3038	230	87,7124		
150	158,7091	240	80,4631		

Os primeiros 5 valores de f_{bv} são iguais porque $\bar{\lambda}_w \leq 0,83$. No gráfico existe uma zona constante do valor de V_t pois o produto da altura com a tensão resistente nessa zona é aproximadamente igual ($h_i \cdot f_{bv,i} = h_{i+1} \cdot f_{bv,i+1}$). Depois, como os valores de f_{bv} vão diminuindo de uma forma menos gradual ($f_{bv,i} - f_{bv,i+1} > f_{bv,i+1} - f_{bv,(i+1)+1}$) e a altura aumenta de uma forma constante, os valores de V_{Nt} vão aumentando. O valor de F_c aumenta progressivamente visto que a força concentrada resistente, $R_{w,Rd}$, vai diminuindo à medida que a altura aumenta, visto que a parcela $\left(9,04 - \frac{h_w/t}{60}\right)$ diminui quando h aumenta.

- Resistência à flexão simples

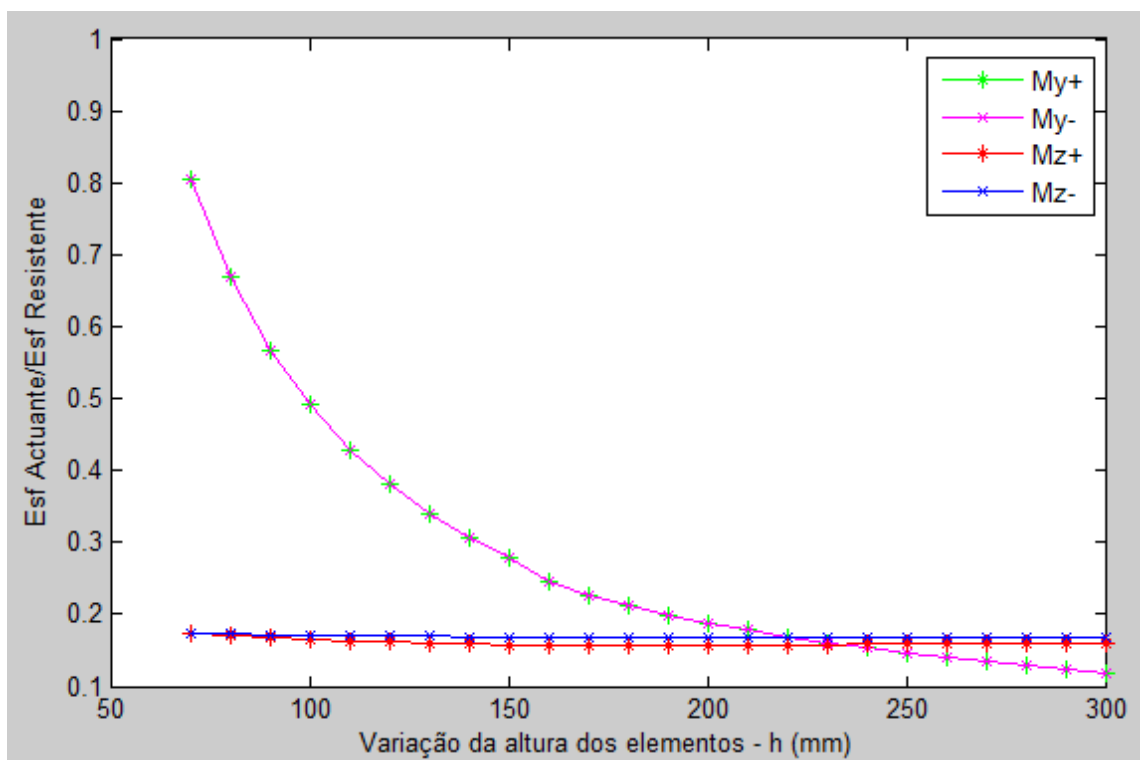


Figura 4.3 – Segurança à flexão simples para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z .

- Resistência à flexão desviada

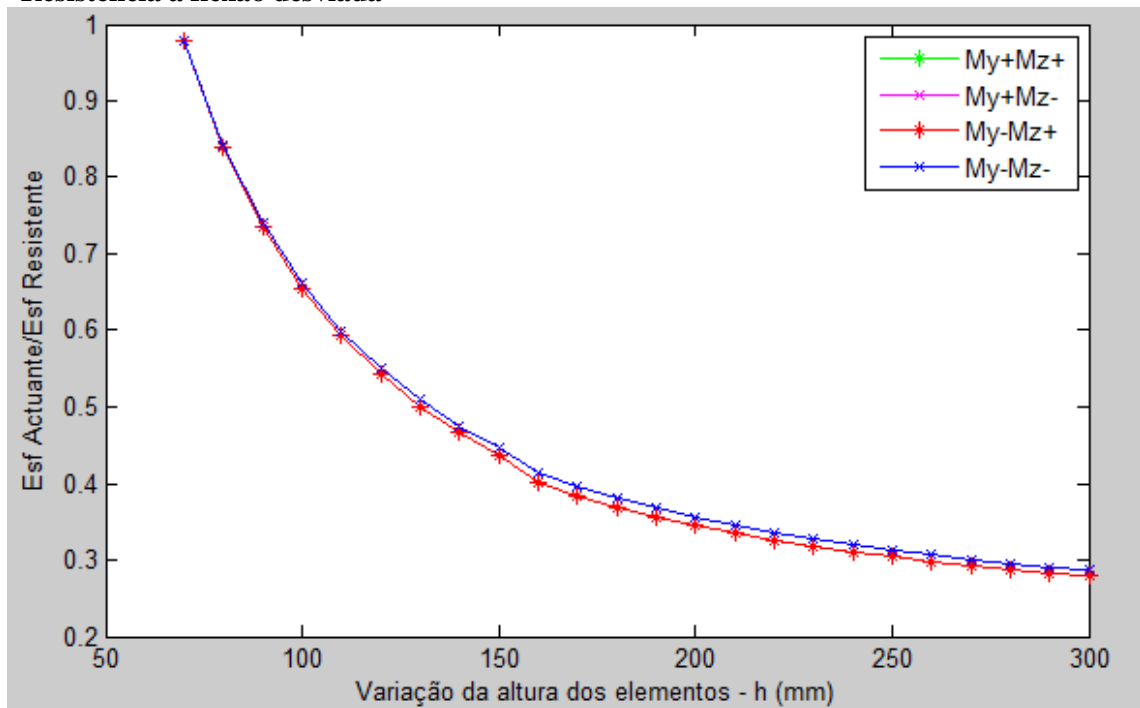


Figura 4.4 – Segurança à flexão desviada para momento fletor positivo ou negativo segundo y ou z.

Na figura 4.3 a segurança é verificada praticamente ao longo de toda a variação da altura. Note-se que M_y^+ coincide com M_y^- , pois y é eixo de simetria; logo o momento segundo este eixo, tanto negativo como positivo, origina os mesmos valores. Os valores em y são progressivamente decrescentes pois o momento resistente depende do módulo de flexão efetivo, W_{eff} (ver 3.5.1.3), e este por sua vez depende do momento de inércia segundo y . A inércia em y varia com a altura dos elementos (pois só há aumento de h , mantendo-se b e c constantes). Aumentando a altura, a inércia também aumenta, o que leva a maiores valores de momento resistente e, consequentemente, a menores valores da relação esforço actuante/esforço resistente. Como a largura dos elementos mantém-se constante, a margem de verificação de segurança relativamente a M_z , mantém-se também aproximadamente constante, pois a resistência a M_z varia principalmente com a largura da secção.

Relativamente à figura 4.4, os valores são todos muito aproximados. Com efeito, a flexão desviada é dada pela soma de flexões simples segundo dois eixos. Como se viu na análise do primeiro gráfico, os momentos segundo y positivos e negativos coincidem e os momentos segundo z positivos e negativos são muito semelhantes. Assim, é natural que os valores de verificação de segurança à flexão desviada tenham o andamento acima representado.

A segurança é verificada desde o princípio.

- Resistência à flexão desviada composta com tração

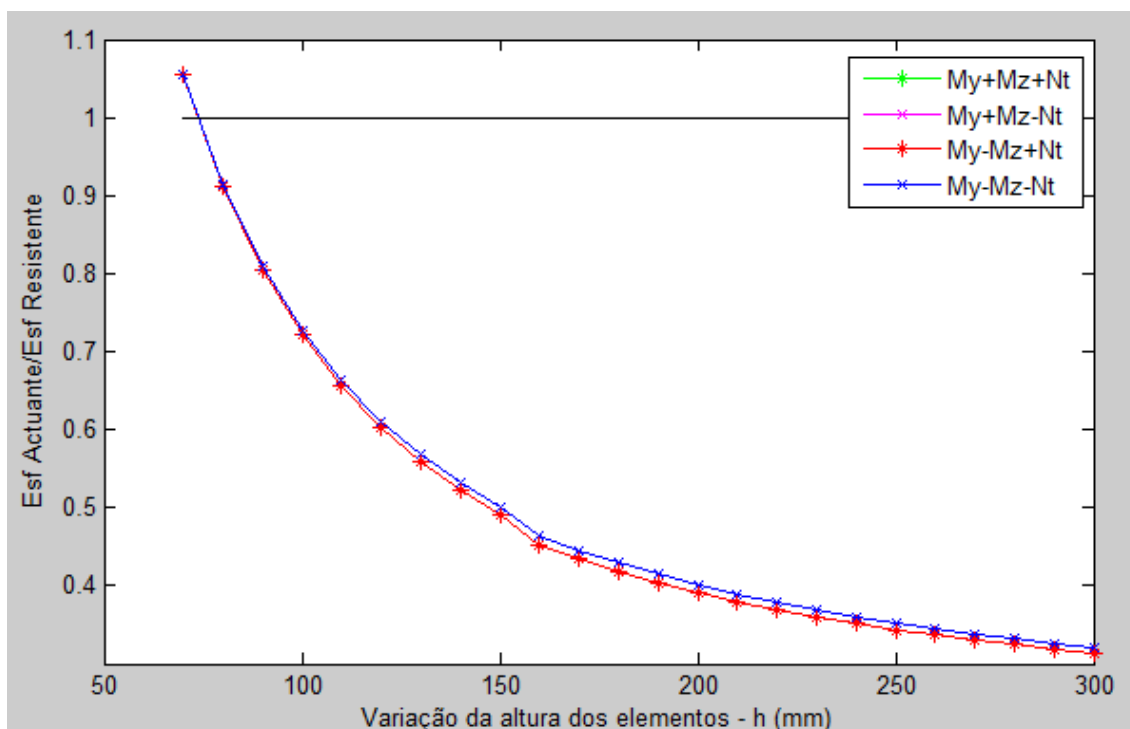


Figura 4.5 – Segurança à flexão desviada composta com tração.

- Resistência à flexão desviada composta com compressão

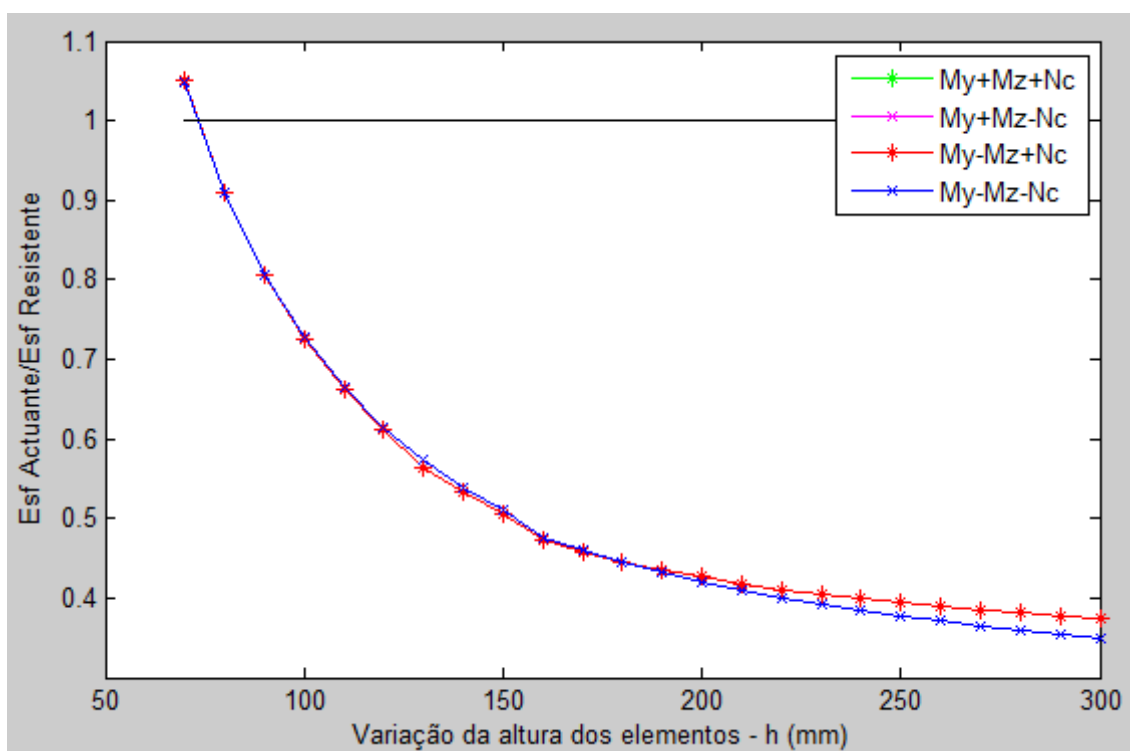


Figura 4.6 – Segurança à flexão desviada composta com compressão.

Verifica-se que, à medida que a altura da secção aumenta, a margem de segurança é cada vez mais confortável, como seria de esperar. Não existe muito a apontar às figuras pois os valores

vão diminuindo como era de prever, não havendo singularidades ou zonas onde a análise seja mais complicada. É de notar que os valores de $M_{y_z^+ N}$ e $M_{y_z^- N}$ são coincidentes, devido ao que foi explicado na análise das figuras anteriores; por isso, apenas um destes rácios é visível. O mesmo acontece para os valores $M_{y_z^+ N}$ e $M_{y_z^- N}$.

É de referir ainda que existe uma zona inicial, para valores de altura relativamente pequenos, em que a segurança não é verificada. No entanto, esta passa a ser garantida rapidamente quando a altura da alma ultrapassa 80mm, aproximadamente.

- Resistência à flexão composta com tração e esforço transversal

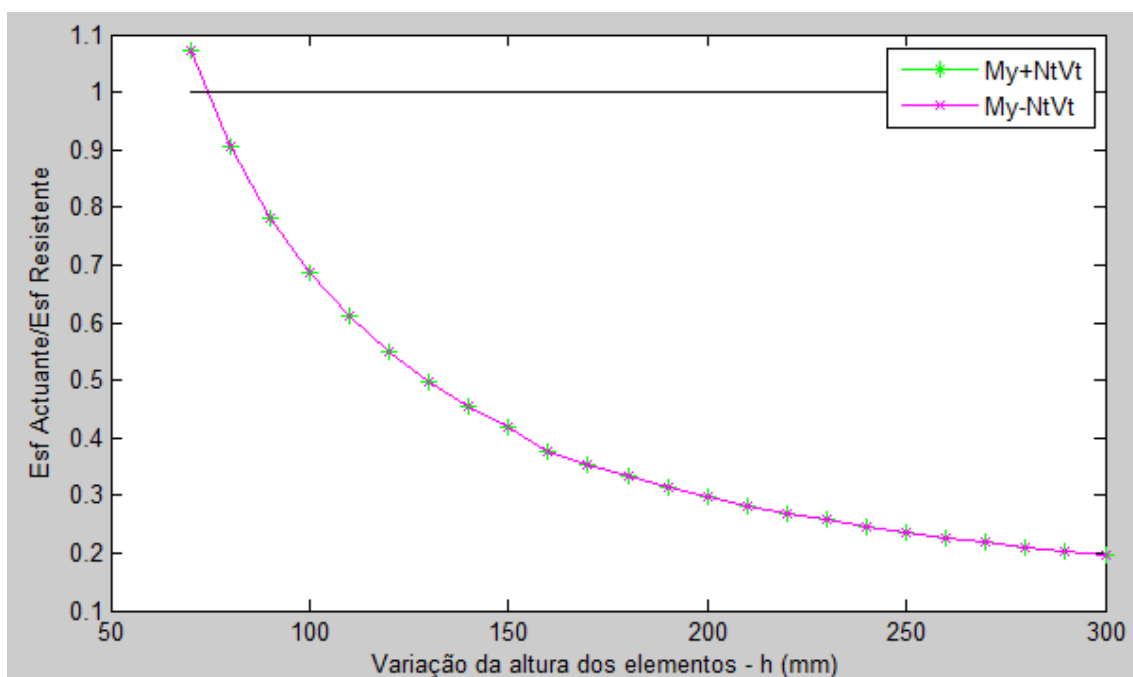


Figura 4.7 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal.

- Resistência à flexão composta com compressão e esforço transversal

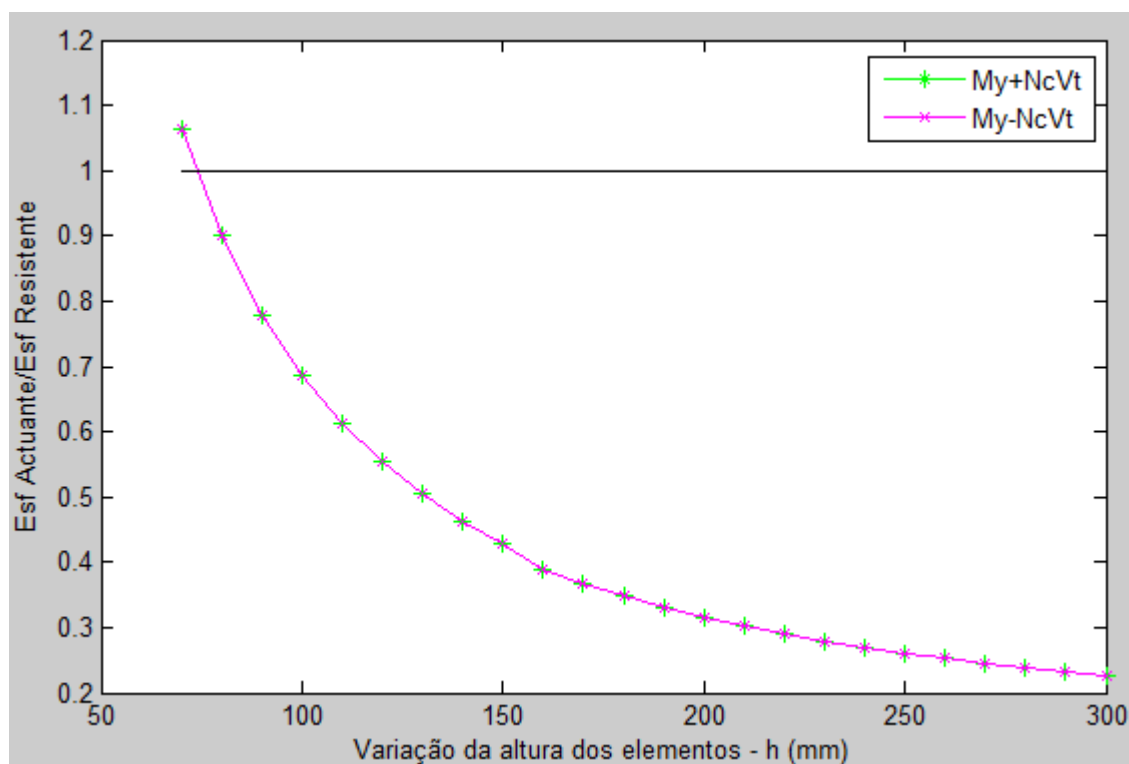


Figura 4.8 – Segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal.

Nas Figuras 4.7 e 4.8, comparativamente com a Figuras 4.5 e 4.6, tem-se em conta também a influência do esforço transversal e apenas se contabiliza o momento fletor em y. Por comparação com as Figuras 4.2, 4.5 e 4.6, esperar-se-ia um comportamento diferente do apresentado na figura acima, pois seria lógico prever que o esforço transversal (V_t) tivesse uma influência considerável na resistência da secção. No entanto, nesta análise contabiliza-se a relação do esforço transversal atuante com o esforço transversal resistente da alma (ver tabela abaixo) e não com o esforço transversal resistente da secção.. Assim, a influência do esforço transversal não é em geral pouco significativa, o que faz com que os gráficos apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8 sejam semelhantes aos das Figuras 4.5 e 4.6.

É de referir ainda que a segurança só é verificada para alturas da alma acima de aproximadamente 75mm, tal como observado nas figuras anteriores.

Tabela 4.2 – Relação esforço transversal atuante (V_{Ed}) com esforço transversal resistente da alma (V_{wRd}).

h (mm)	V_{Ed}/V_{wRd}	h (mm)	V_{Ed}/V_{wRd}	h (mm)	V_{Ed}/V_{wRd}
70	0.1888	160	0.0805	250	0.0511
80	0.1642	170	0.0756	260	0.0491
90	0.1453	180	0.0714	270	0.0473
100	0.1303	190	0.0676	280	0.0456
110	0.1181	200	0.0641	290	0.0440
120	0.1080	210	0.0610	300	0.0425
130	0.0995	220	0.0582		
140	0.0922	230	0.0556		
150	0.0859	240	0.0533		

- Resistência à flexão desviada e forças concentradas

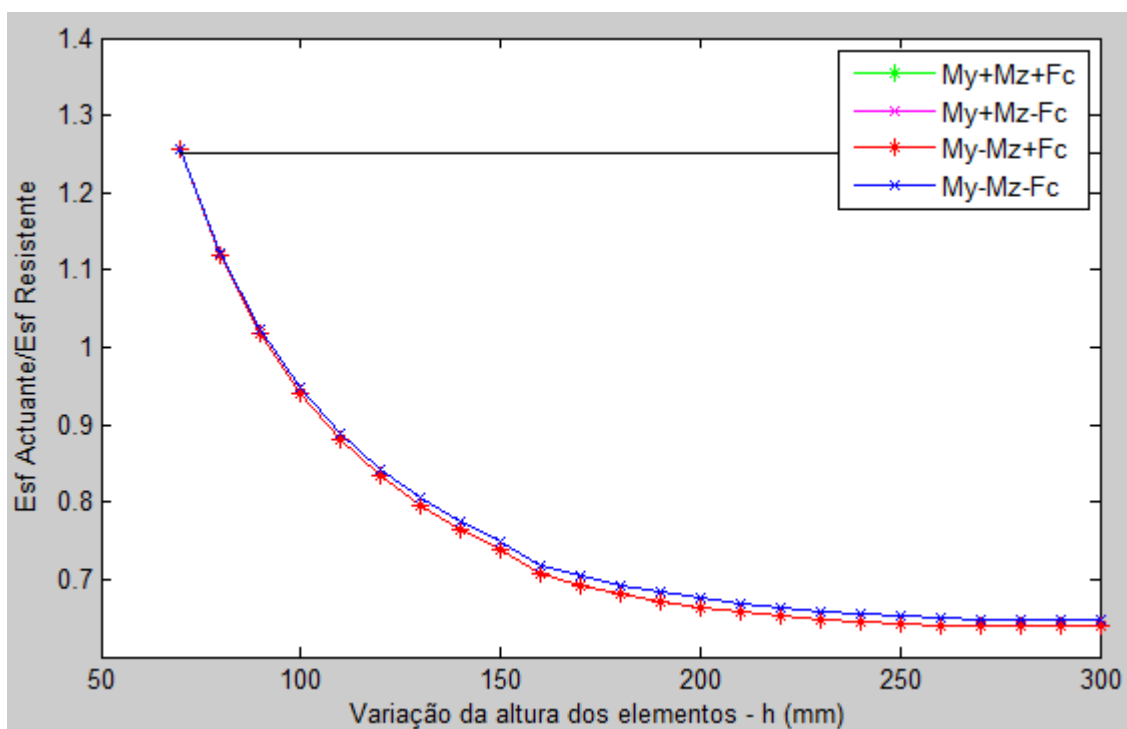


Figura 4.9 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas.

Contrariamente ao que acontece relativamente ao esforço transversal, a contabilização dos valores da verificação de segurança às forças concentradas é direta, não havendo parâmetros que diminuam a sua influência. Nota-se, por isso, que os valores nos gráficos da figura acima são um pouco superiores aos dos gráficos das Figuras 4.7 e 4.8. É devido a essa contabilização direta, que pode provocar uma grande influência na verificação de segurança à flexão desviada e forças concentradas, que o limite para a verificação de segurança, relação entre esforço atuante e

resistente, passa de 1,0 para 1,25 (ver 3.5.1.10). Se não houvesse essa diferença, a segurança só seria verificada a partir de valores de altura da ordem de 100mm. Assim, com o valor limite de 1,25, a segurança é verificada a partir de alturas da alma de aproximadamente 70mm.

Resistência à encurvadura

- Resistência à encurvadura devida à compressão

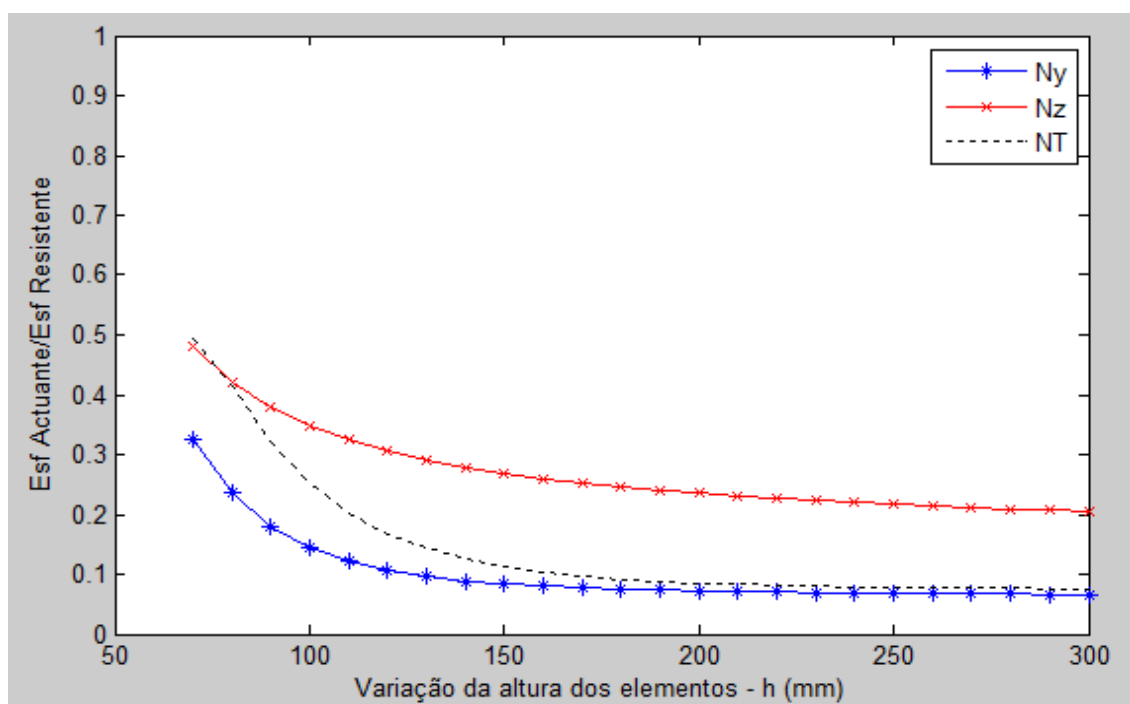


Figura 4.10 – Segurança à compressão (Ny corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em y; Nz corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em z; o valor de NT corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por torção/torção-flexão em y).

- Resistência encurvadura devida à flexão simples

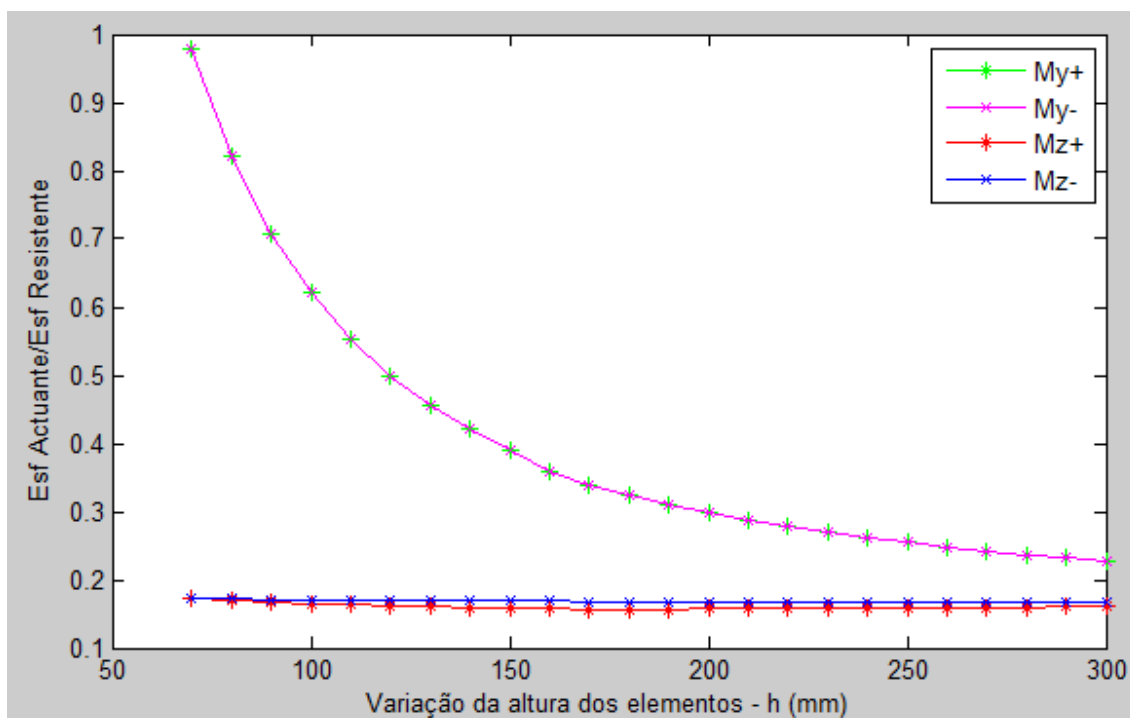


Figura 4.11 – Segurança à flexão simples.

No gráfico da Figura 4.10, a variação dos valores depende do coeficiente de redução de resistência, χ . À medida que a altura dos elementos aumenta, o rácio de resistência à encurvadura dos diferentes modos tende a estabilizar pois a esbelteza normalizada também vai estabilizando. Os valores de rácio de resistência à encurvadura por flexão em z são superiores porque a esbelteza assume valores maiores e quanto maior for a esbelteza normalizada, menor é o coeficiente de redução de resistência e, conseqüentemente, menores são os esforços resistentes.

Os valores do gráfico da Figura 4.11 têm um comportamento muito semelhante aos dos valores do gráfico da Figura 4.3, variando da mesma forma (ver análise da Figura 4.3). Os valores referentes ao momento fletor em z são os mesmos que os da Figura 4.3 pois os coeficientes de redução calculados para a encurvadura lateral/torção têm apenas em conta o momento de maior inércia (momento em y). A segurança é verificada desde o princípio.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1

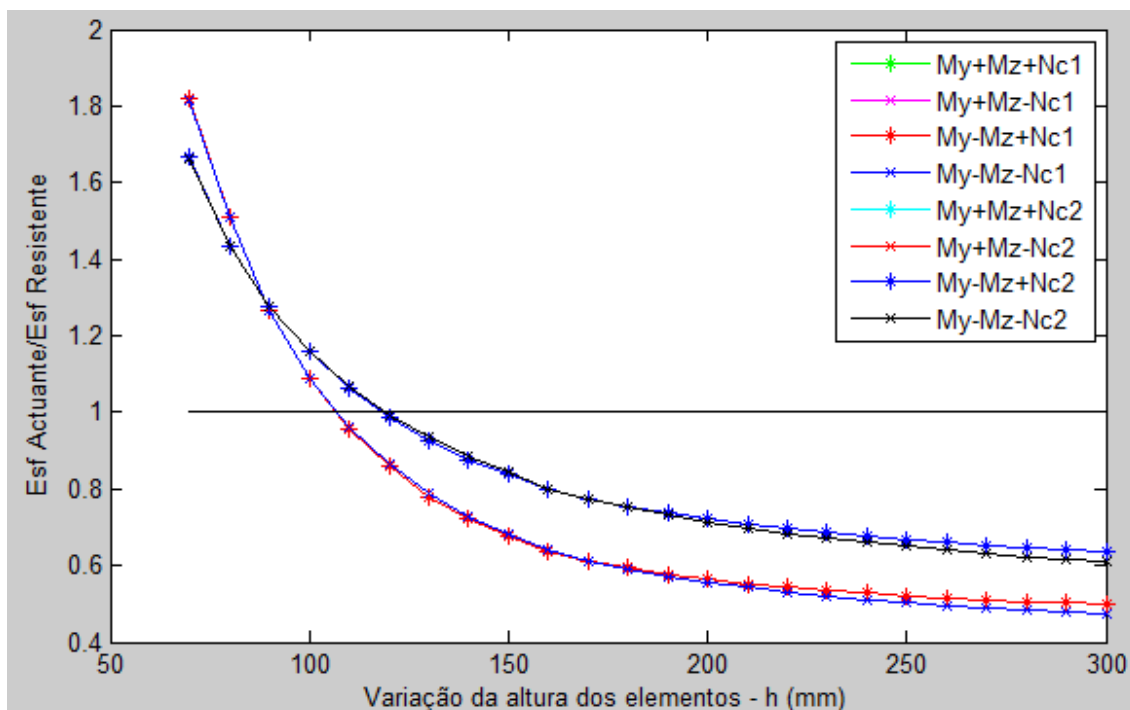


Figura 4.12 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os índices terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3).

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3

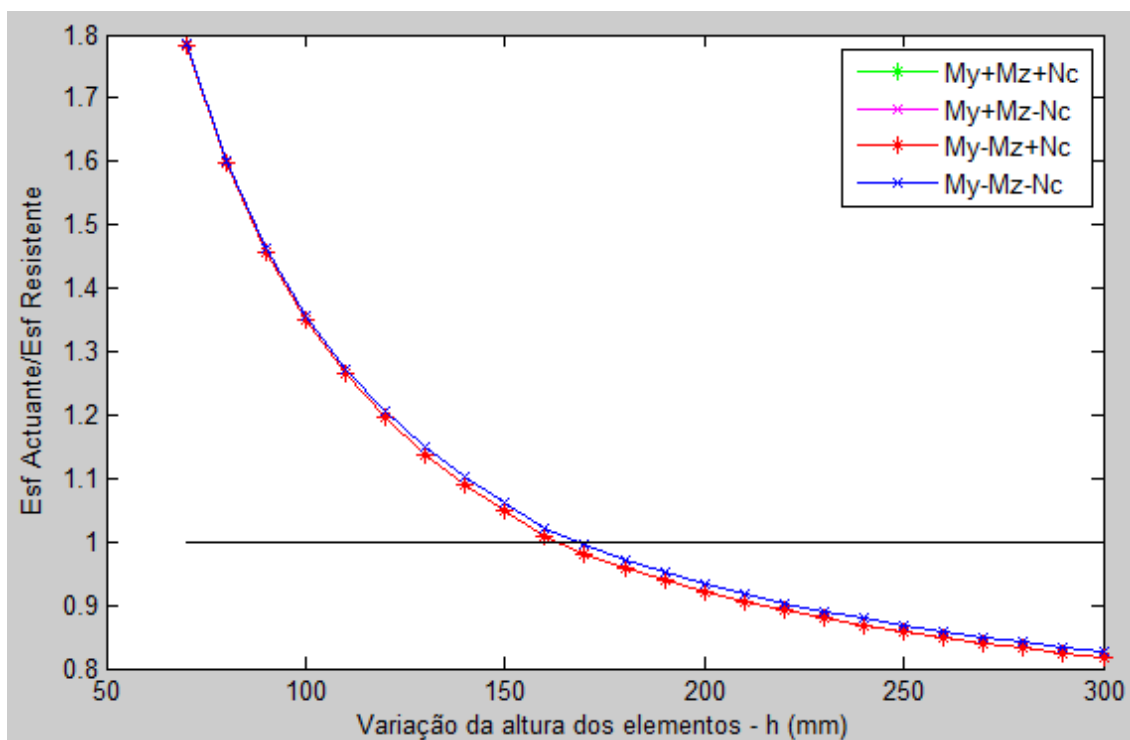


Figura 4.13 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.

Equações utilizadas para obtenção dos valores da Figura 4.12:

$$\frac{\frac{|N_{Ed}|}{\min(\chi_Y, \chi_T) \cdot N_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (1)$$

$$\frac{\frac{|N_{Ed}|}{\min(\chi_Z, \chi_T) \cdot N_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (2)$$

Equação utilizada para obtenção dos valores da Figura 4.13:

$$\frac{\frac{|M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdy}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{|M_{Ed,z}|}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rdz}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0$$

Nesta análise, onde se varia a altura da alma, nota-se que a verificação de segurança relativamente à encurvadura em flexão desviada composta com compressão é a mais condicionante. Isto justifica-se pelo facto de os parâmetros relacionados com a segurança à encurvadura, nomeadamente os coeficientes de redução, provocarem uma redução nos esforços resistentes. Pode observar-se que os rácios da Figura 4.14 são maiores que os da Figura 4.13, sendo pois a análise segundo a EN1993-1-3 mais condicionante. Relativamente ao primeiro gráfico existem dois agrupamentos (1 e 2) que assumem valores diferentes pois utilizam-se diferentes fatores de interação em cada agrupamento.

Assim, no caso mais condicionante, ou seja, de acordo com a EN1993-1-3, a segurança só é verificada para alturas da alma superiores a, aproximadamente, 170 mm.

- Resistencia à encurvadura à flexão desviada composta com tracção

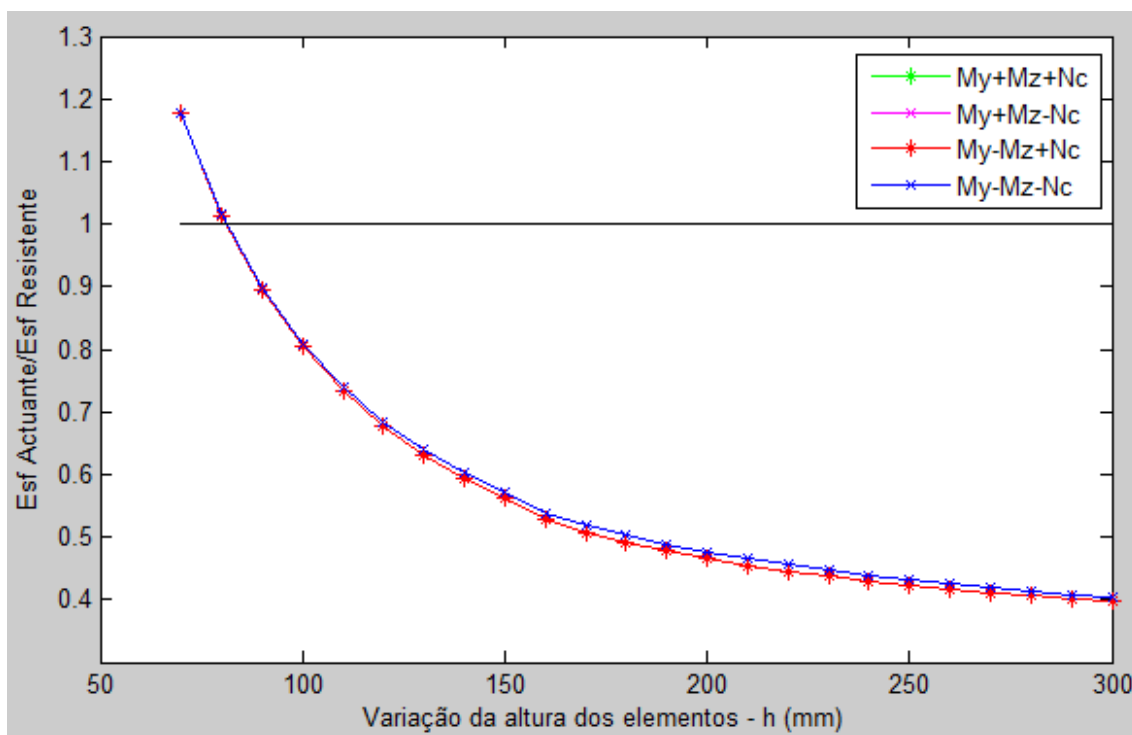


Figura 4.14 – Segurança à flexão desviada composta com tracção.

Tendo em conta a expressão indicada em 3.5.2.4, verifica-se que os valores apresentados na Figura 4.15 são semelhantes aos apresentados na Figura 4.12. Estes valores apresentam o andamento esperado, diminuindo à medida que a altura da alma aumenta.

Relativamente à segurança, esta passa a ser verificada quando a altura da alma ultrapassa, aproximadamente, 90 mm.

4.2. Variação da espessura dos elementos

Para efetuar esta análise, foram definidos os seguintes esforços atuantes sobre a secção e dimensões da secção transversal, para além da sua espessura:

- $N_{Ed} = 10 \text{ kN}$;
- $V_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para a espessura (t) com um valor mínimo de 1 mm, um valor máximo de 6 mm e uma variação de 0.1 mm entre valores sucessivos ($t=1.0, 1.1, 1.2, \dots, 5.9, 6.0 \text{ mm}$).

Definidos estes parâmetros, procedeu-se ao dimensionamento da secção, obtendo-se os seguintes resultados:

Resistência da secção

- Resistência ao esforço axial

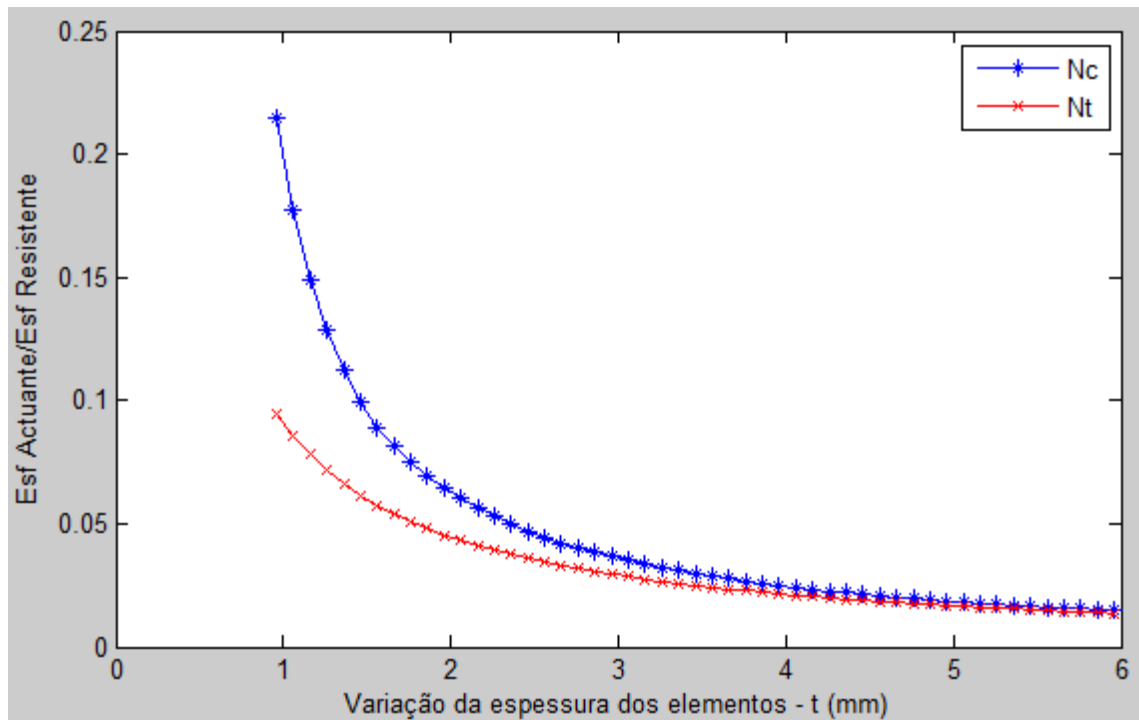


Figura 4.15 – Segurança ao esforço axial de compressão (N_c) e de tração (N_t).

- Resistência ao esforço transversal e forças concentradas

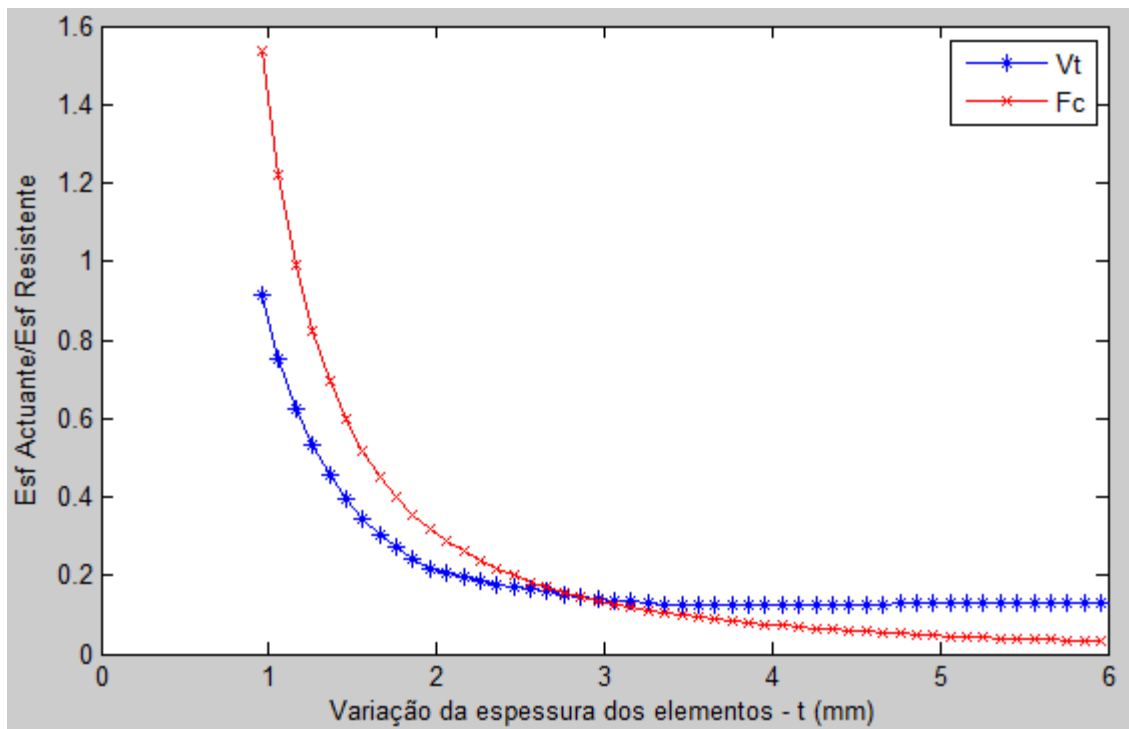


Figura 4.16 – Segurança ao esforço transversal (V_t) e às forças concentradas (F_c).

Contrariamente ao que acontece quando a altura da alma aumenta, quando a espessura aumenta o valor de N_c diminui pois tanto o valor da área efectiva à compressão como o coeficiente de redução, ρ , aumentam, sendo que este último parâmetro acaba por atingir o valor máximo de 1. O valor de N_t também vai diminuindo, pois a área aumenta.

No segundo gráfico também se observa uma diferença importante, pois o rácio de segurança quer ao esforço transversal quer às forças concentradas vai diminuindo com o aumento da espessura. Este rácio relativo ao esforço transversal, depende da tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} , a qual toma os valores indicados na tabela seguinte:

Tabela 4.3 – Variação da tensão resistente ao esforço transversal, f_{bv} , com a espessura dos elementos.

t (mm)	f_{bv} (MPa)	t (mm)	f_{bv} (MPa)	t (mm)	f_{bv} (MPa)	t (mm)	f_{bv} (MPa)
1,0	27,5801	2,4	149,0975	3,8	203,0000	5,2	203,0000
1,1	33,6691	2,5	155,2607	3,9	203,0000	5,3	203,0000
1,2	40,3741	2,6	161,4320	4,0	203,0000	5,4	203,0000
1,3	47,6975	2,7	167,6114	4,1	203,0000	5,5	203,0000
1,4	55,6417	2,8	173,7990	4,2	203,0000	5,6	203,0000
1,5	64,2091	2,9	179,9948	4,3	203,0000	5,7	203,0000
1,6	73,4021	3,0	186,1988	4,4	203,0000	5,8	203,0000
1,7	83,2233	3,1	192,4110	4,5	203,0000	5,9	203,0000
1,8	104,7596	3,2	198,6314	4,6	203,0000	6,0	203,0000
1,9	116,4797	3,3	203,0000	4,7	203,0000		
2,0	124,5258	3,4	203,0000	4,8	203,0000		
2,1	130,6566	3,5	203,0000	4,9	203,0000		
2,2	136,7955	3,6	203,0000	5,0	203,0000		
2,3	142,9424	3,7	203,0000	5,1	203,0000		

Como o valor de f_{bv} vai aumentando, consequentemente o esforço transversal resistente também aumenta, o que faz com que o valor de verificação de segurança relativo ao esforço transversal diminua, tornando-se constante quando f_{bv} é constante. O valor de F_c diminui progressivamente visto que a força concentrada resistente, $R_{w,Rd}$, vai aumentando à medida que a espessura aumenta.

- Resistência à flexão simples

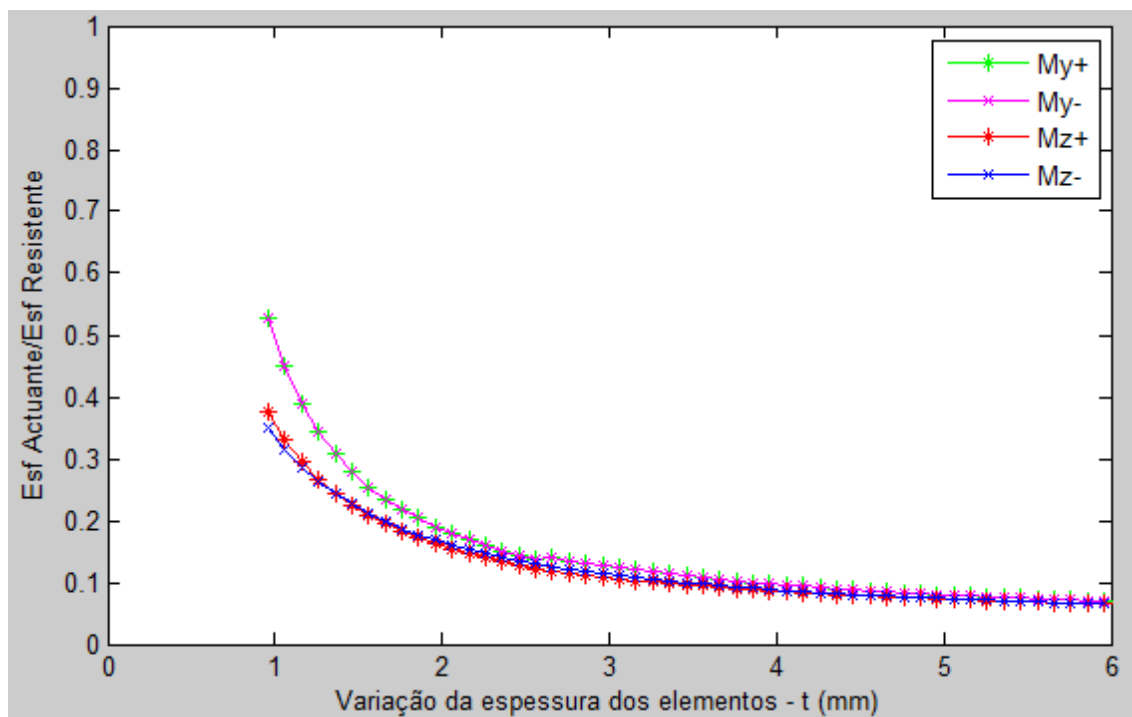


Figura 4.17 – Segurança à flexão simples para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z.

- Resistência à flexão desviada

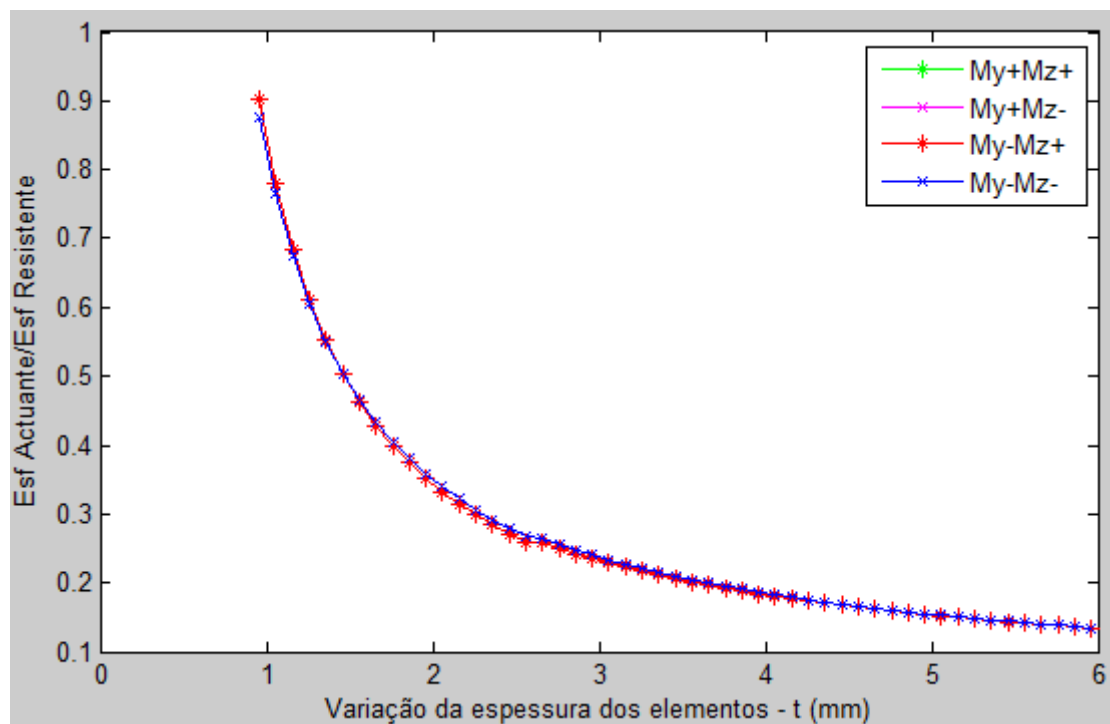


Figura 4.18 – Segurança à flexão desviada para momento fletor, positivo ou negativo segundo y ou z.

Neste caso, todas as espessuras consideradas verificam a segurança, sendo que, com o aumento progressivo da espessura, os valores de verificação de segurança vão diminuindo, como seria de esperar.

- Resistência à flexão desviada composta com tração

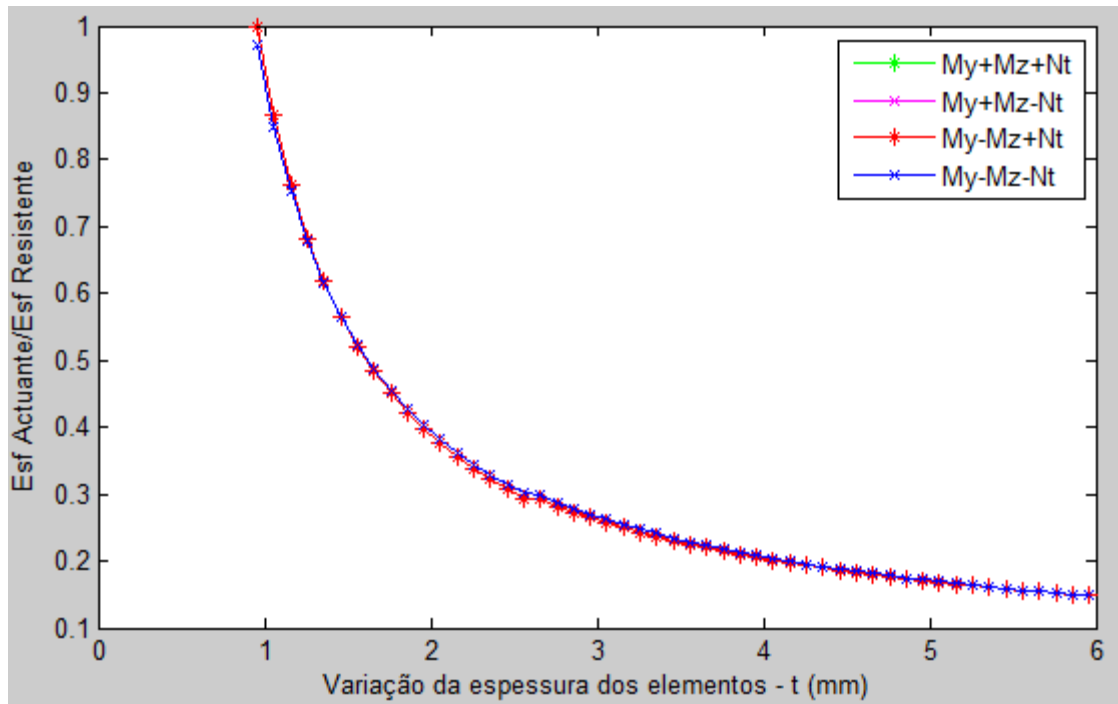


Figura 4.19 – Segurança à flexão desviada composta com tração.

- Resistência à flexão desviada composta com compressão

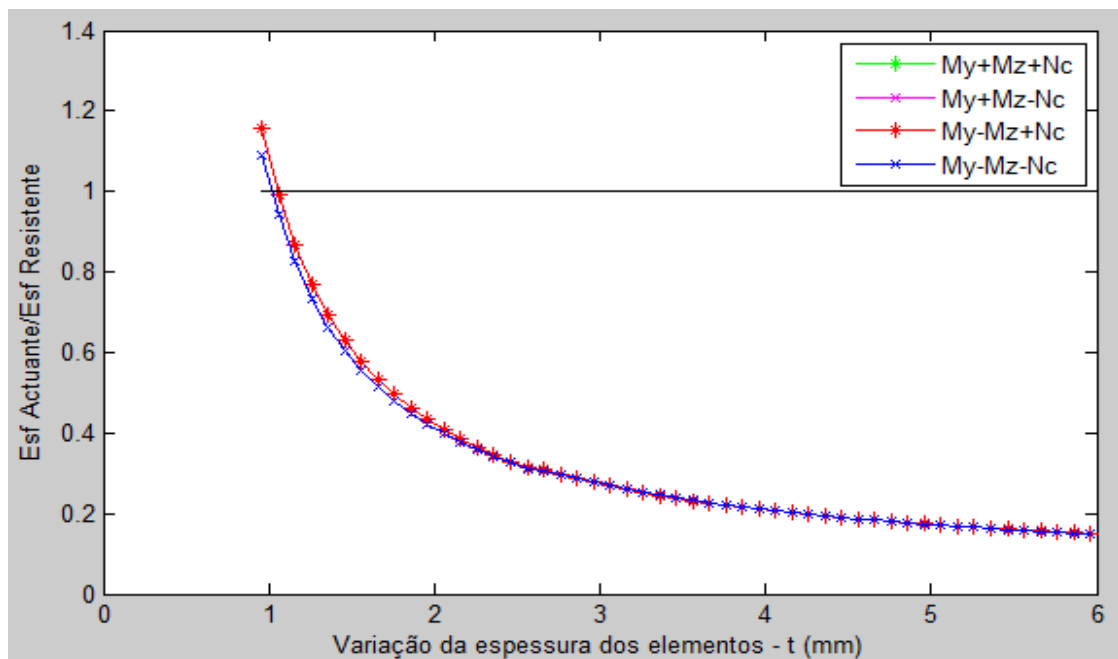


Figura 4.20 – Segurança à flexão desviada composta com compressão.

Verifica-se que, à medida que a espessura da secção aumenta a verificação de segurança é cada vez mais confortável, como seria de esperar. Os rácios de segurança vão diminuindo sem quaisquer singularidades ou variações bruscas.

É de referir ainda que existe uma zona inicial, para valores de espessura relativamente pequenos, em que a segurança não é verificada. No entanto, esta passa a ser garantida quando a espessura ultrapassa 1,2 mm, aproximadamente.

- Resistência à flexão composta com tração e esforço transversal

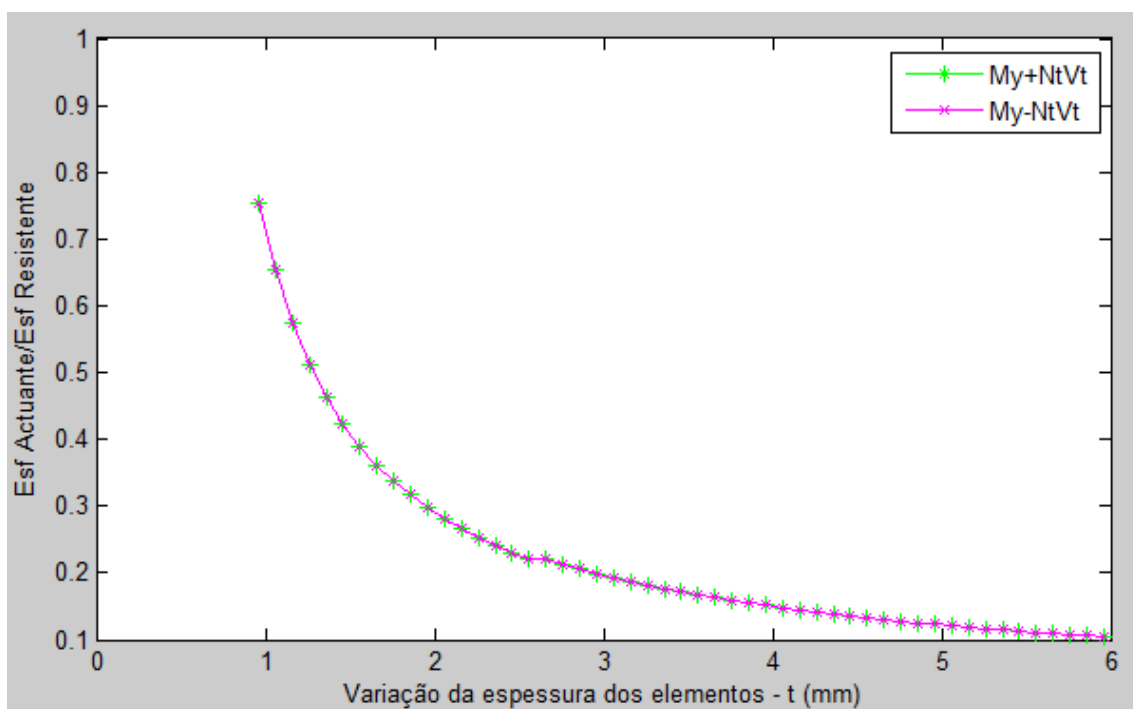


Figura 4.21 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal.

- Resistência à flexão composta com compressão e esforço transversal

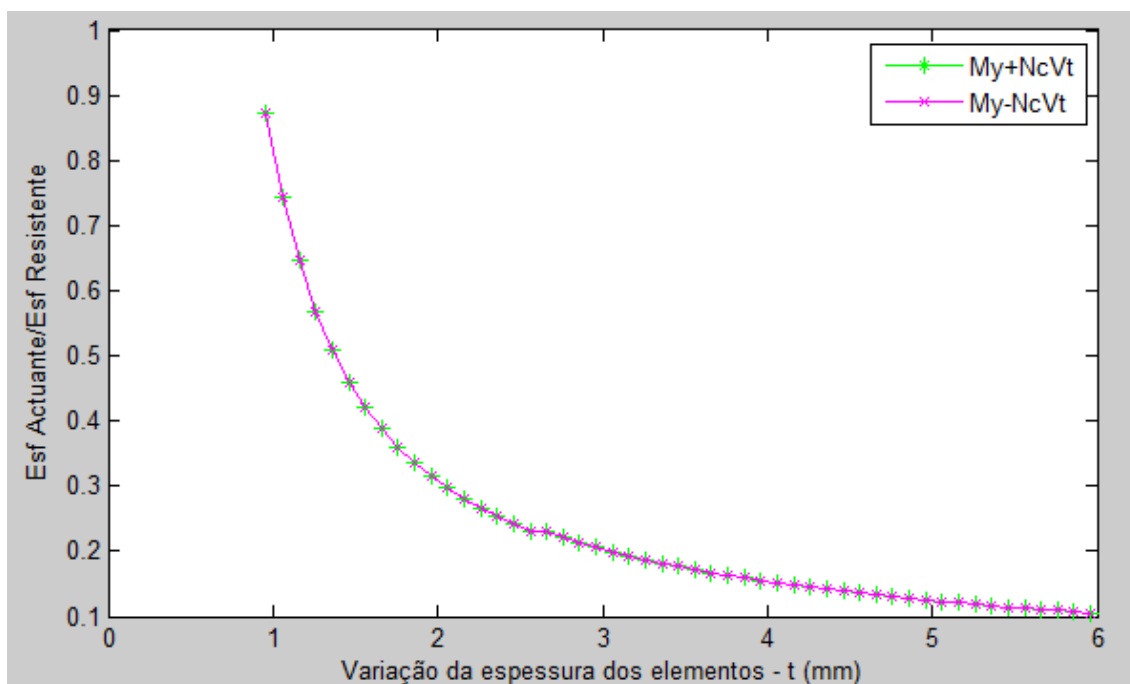


Figura 4.22 – Verificação de segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal.

A análise destas figuras acaba por ser idêntica à análise feitas para as Figuras 4.7 e 4.8, já que a variação dos valores é muito semelhante. Verifica-se, no entanto, que os valores destas figuras são um pouco inferiores que os das Figuras 4.7 e 4.8 o que permite concluir que o aumento da espessura dos elementos é mais vantajoso em termos de verificação de segurança do que o aumento da altura da alma.

- Resistência à flexão desviada e forças concentradas

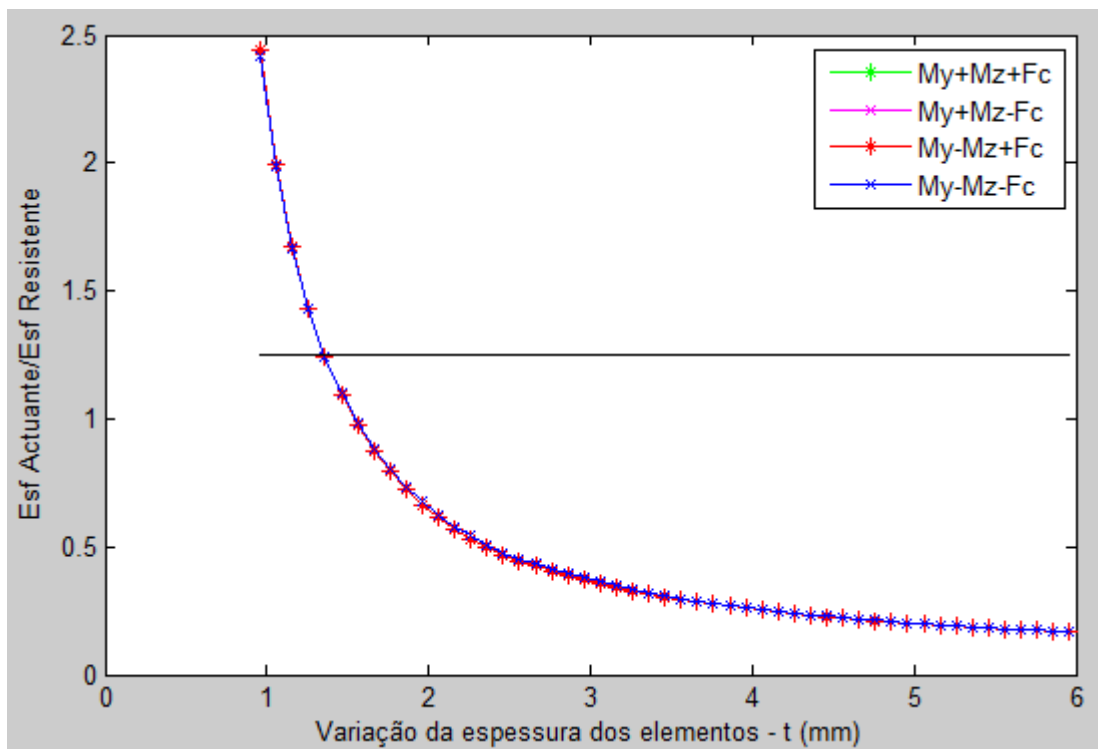


Figura 4.23 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas.

A contabilização do efeito das forças concentradas na resistência à flexão desviada influencia negativamente a verificação de segurança. Assim, a segurança só é verificada para espessuras superiores a, aproximadamente, 1,5 mm.

Resistência à encurvadura

- Resistência à encurvadura ao esforço de compressão

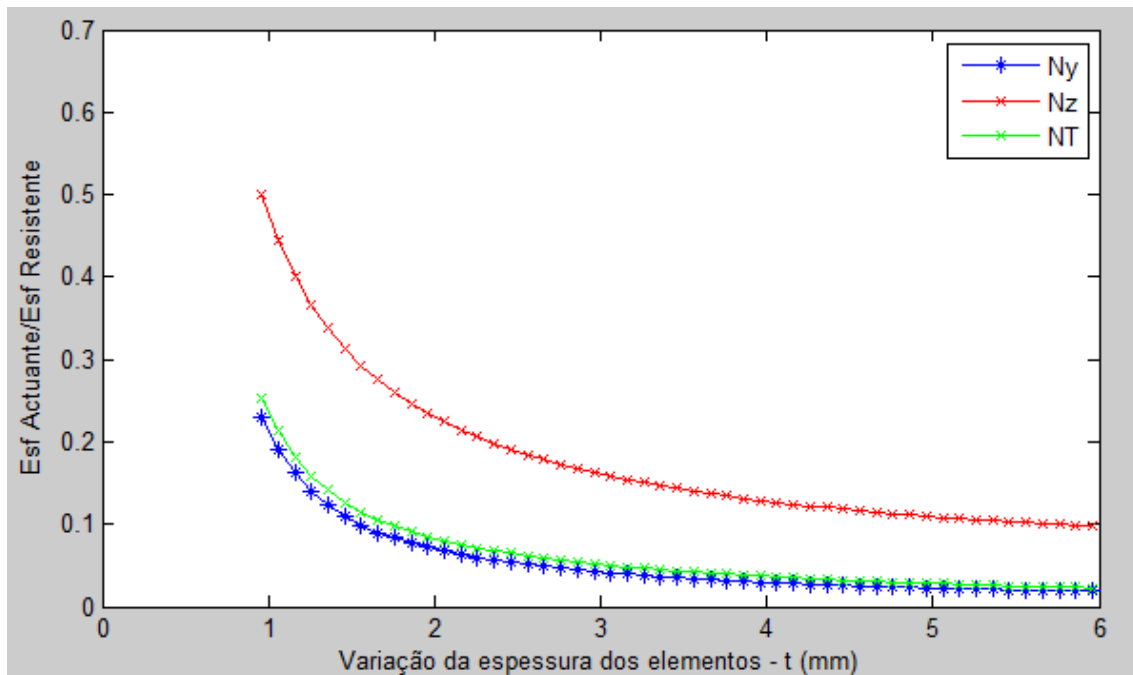


Figura 4.24 – Segurança à compressão (N_{yb} corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em y; N_{zb} corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por flexão em z; o valor de NT_b corresponde ao rácio de resistência à encurvadura por torção/torção-flexão em y).

- Resistência à encurvadura à flexão simples

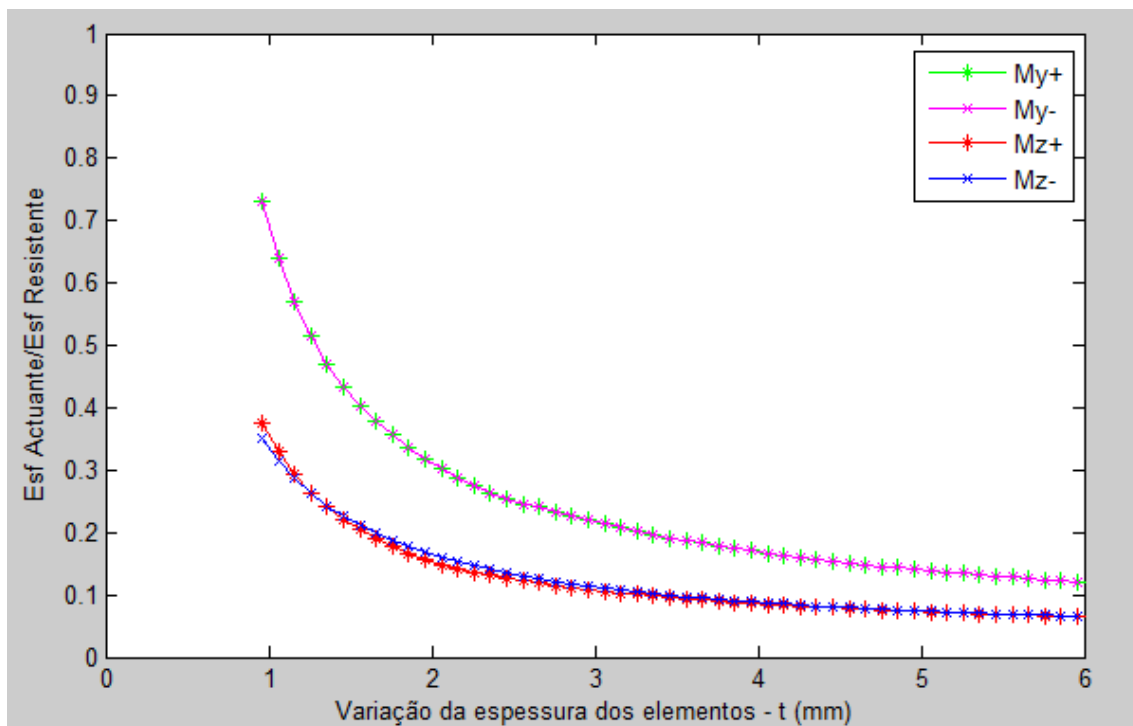


Figura 4.25 – Segurança à flexão simples.

No gráfico da Figura 4.24, a variação dos valores depende do coeficiente de redução de resistência χ ; verificando-se que os valores deste coeficiente vão aumentando. Como estes valores vão aumentando, o esforço resistente também aumenta, fazendo com que a variação dos valores tenha aquele andamento.

Relativamente ao gráfico da Figura 4.25, os valores vão diminuindo à medida que a espessura aumenta, como seria de esperar.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1

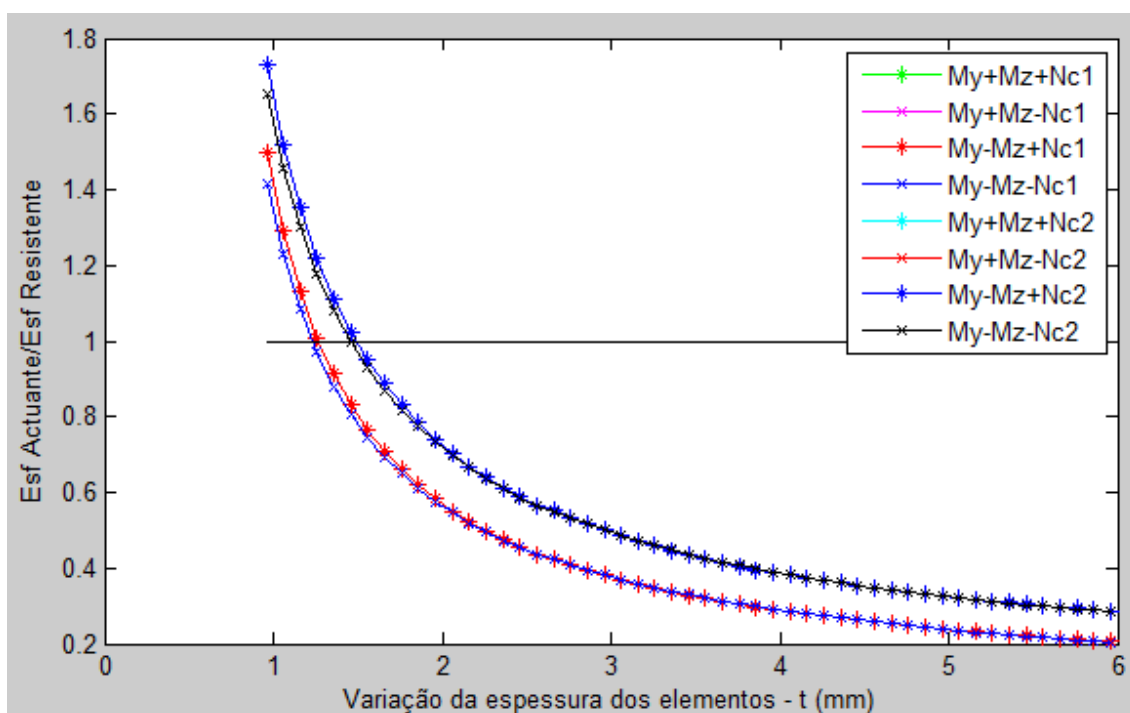


Figura 4.26 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3).

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3

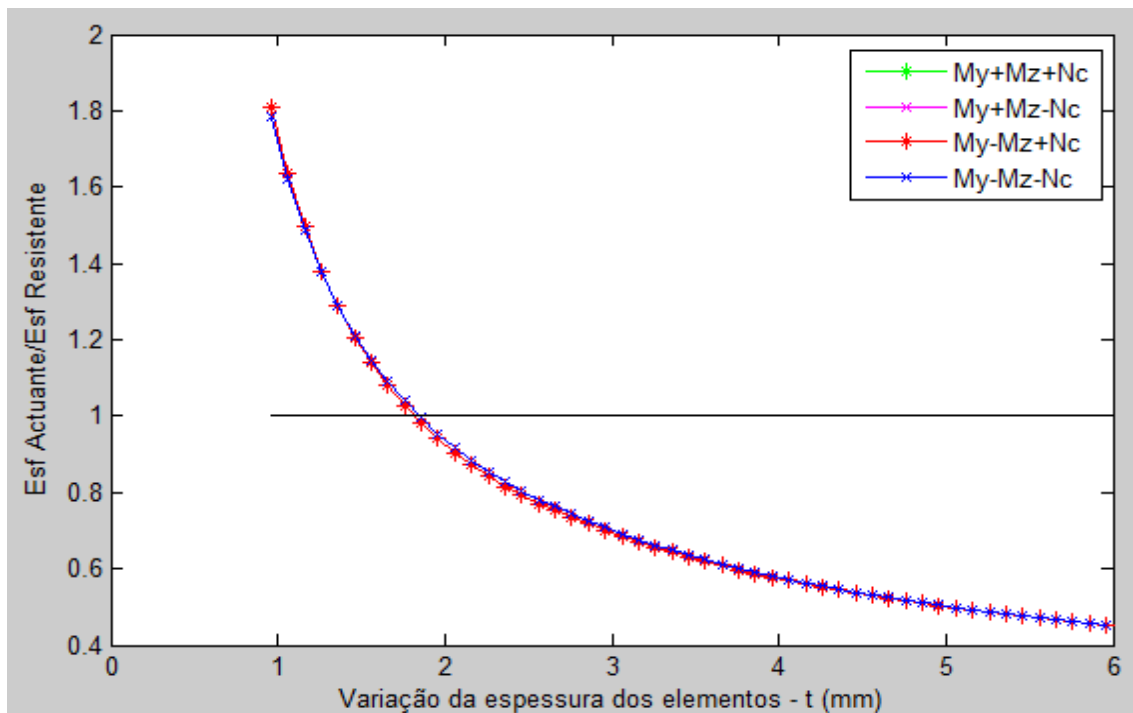


Figura 4.27 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.

As análises representadas nestas figuras são idênticas às das Figuras 4.12 e 4.13, embora nessas figuras, se faça variar a altura da alma. À medida que a espessura dos elementos aumenta, mais facilmente se verifica a segurança. No entanto a segurança só é verificada para espessuras superiores a, aproximadamente, 1,9 mm no caso mais condicionante, ou seja, a Figura 4.27.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com tração

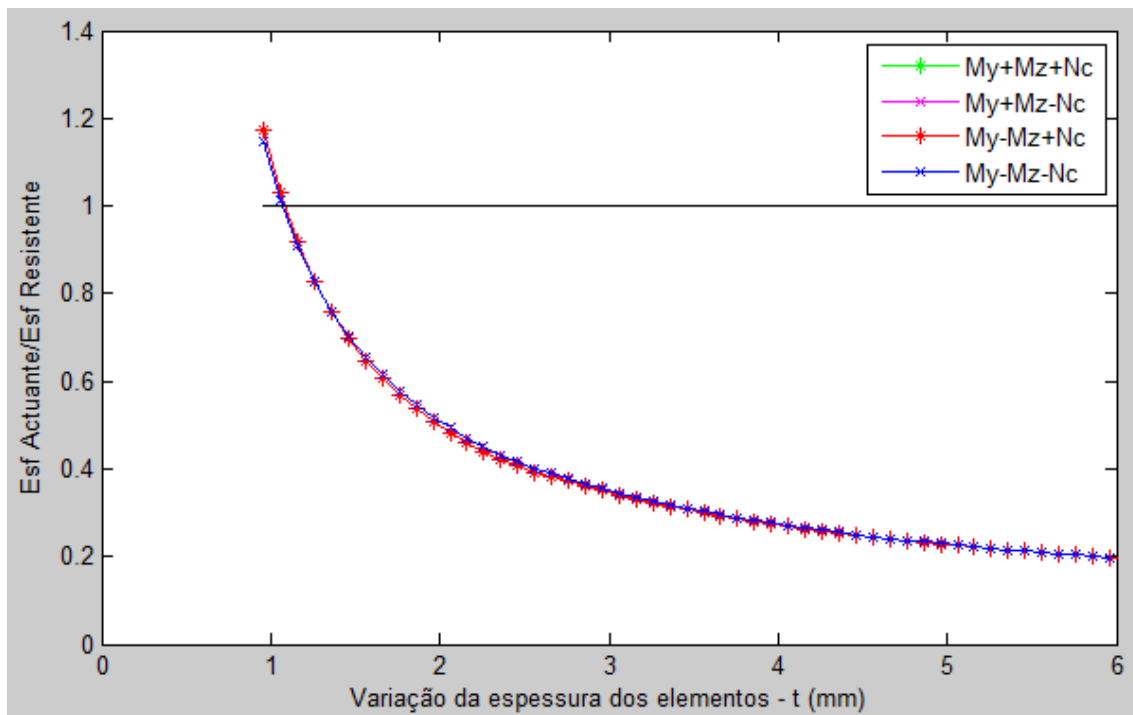


Figura 4.28 - Segurança à flexão desviada composta com tração.

A análise representada nesta figura é idêntica à da Figura 4.14, embora nessa figura, se faça variar a altura da alma. A segurança passa a ser verificada praticamente a partir dos 1,2mm de espessura, aproximadamente.

4.3. Variação do esforço de compressão

Para efetuar esta análise, foram definidos os seguintes parâmetros:

- $V_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para o esforço de compressão com um valor mínimo de 5 kN, um valor máximo de 55 kN e uma variação de 2 kN entre valores sucessivos ($N_{Ed}=5, 7, \dots, 53, 55 \text{ kN}$).

Definidos todos estes parâmetros, procedeu-se à verificação da secção. Os valores apresentados correspondem apenas à resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1 e a EN1993-1-3 pois é esta combinação que condiciona mais a verificação de segurança.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo o EN1993-1-1

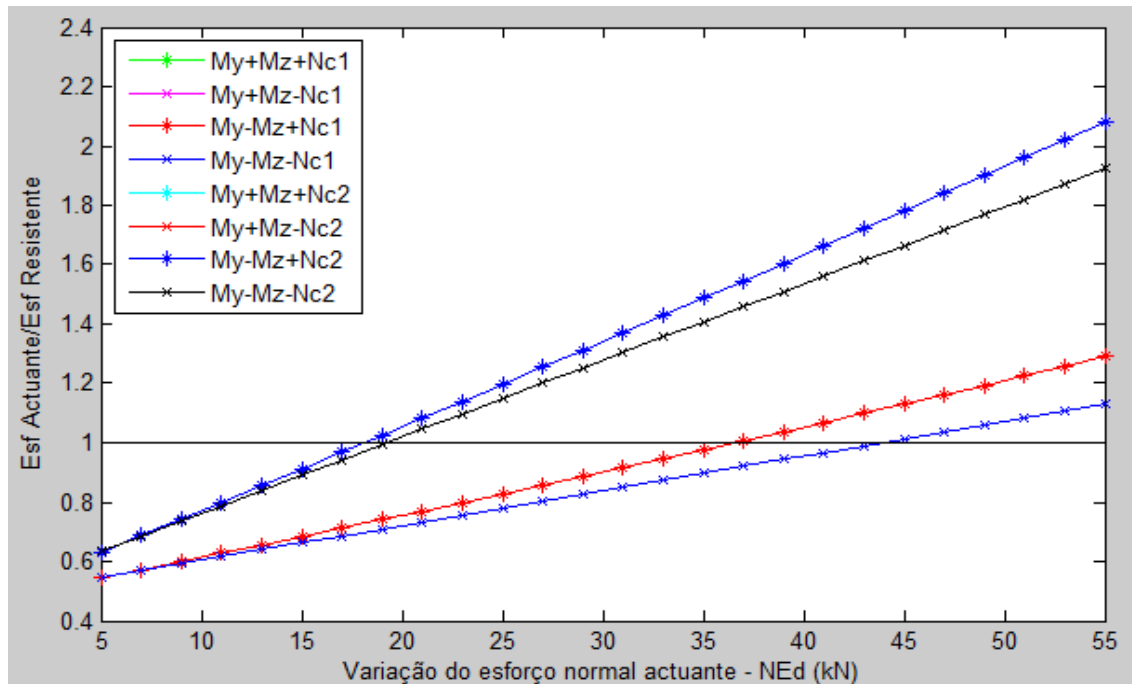


Figura 4.29 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3).

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo o EN1993-1-3

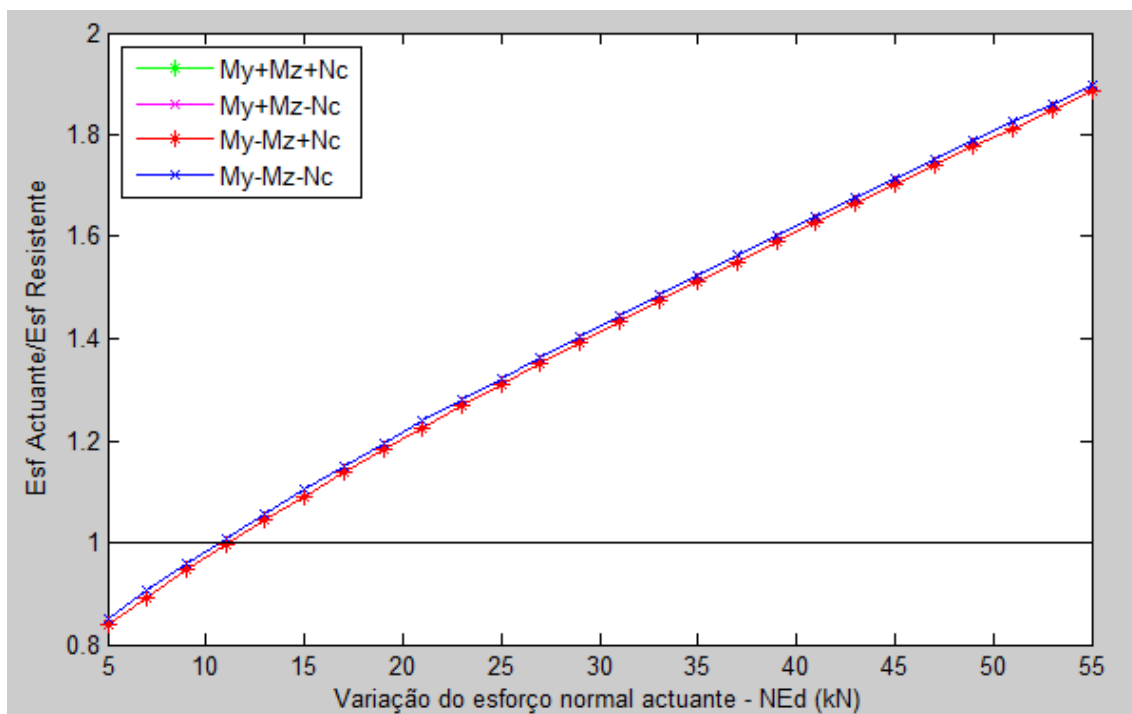


Figura 4.30 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3.

Obviamente, a segurança deixa de ser verificada quando a razão esforço atuante-esforço resistente é superior a 1. Os valores da Figura 4.30 são mais condicionantes que os da Figura 4.31, deixando a segurança de ser verificada para esforços de compressão próximos de 11 kN. Como seria de esperar, para uma secção com dimensões fixas, à medida que se aumenta o esforço atuante mais dificilmente se verifica a segurança.

4.4. Variação do esforço transversal

Para efetuar esta análise, foram definidos os seguintes parâmetros:

- $N_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para o esforço transversal com um valor mínimo de 5 kN, um valor máximo de 55 kN e uma variação de 2 kN entre valores sucessivos ($F_{Ed}=5, 7, 9, \dots, 53, 55 \text{ kN}$).

Definidos todos estes parâmetros, procedeu-se ao dimensionamento da secção. Os valores apresentados correspondem apenas à resistência ao esforço transversal e forças concentradas e à flexão desviada composta com tração ou compressão e esforço transversal pois são estas combinações que condicionam mais a verificação de segurança.

- Resistência ao esforço transversal

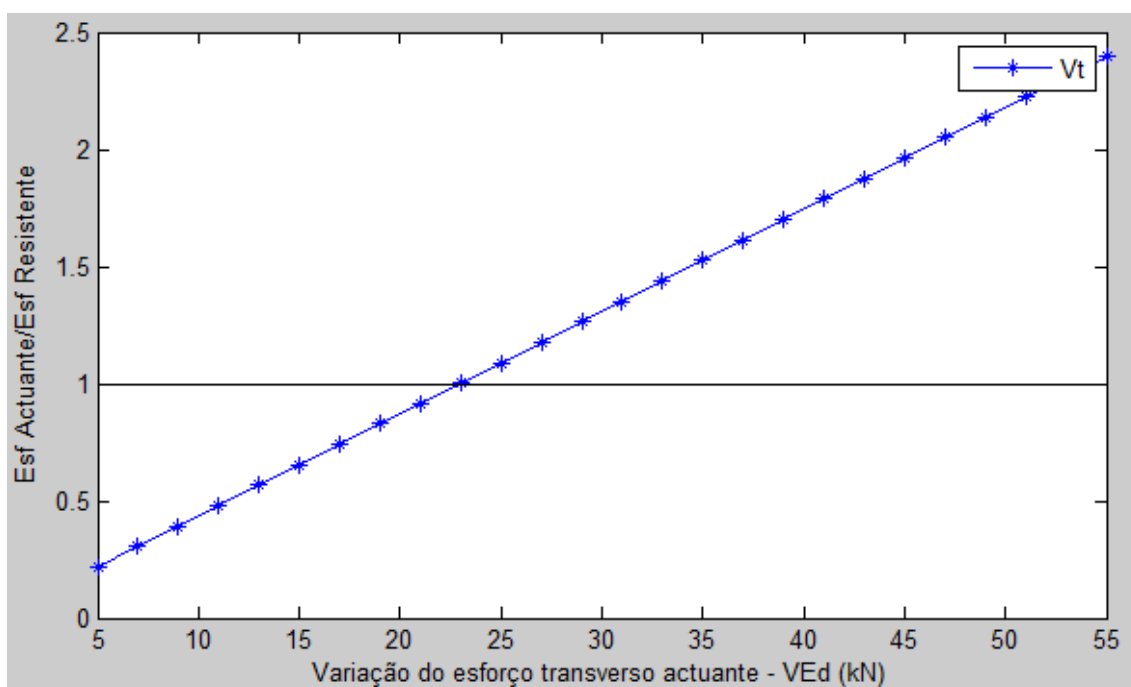


Figura 4.31 – Segurança ao esforço transversal e às forças concentradas, para esforço transversal variável.

Observando a figura, verifica-se que a segurança deixa de ser assegurada quando o esforço transversal ultrapassa 24 kN, aproximadamente. Comparando as resistências ao esforço transversal e ao esforço de compressão verifica-se que os perfis enformados a frio são menos resistentes ao esforço transversal pois, para a mesma secção, o esforço transversal resistente é 6 kN menor que o esforço de compressão resistente.

- Resistência à flexão composta com tração e esforço transversal

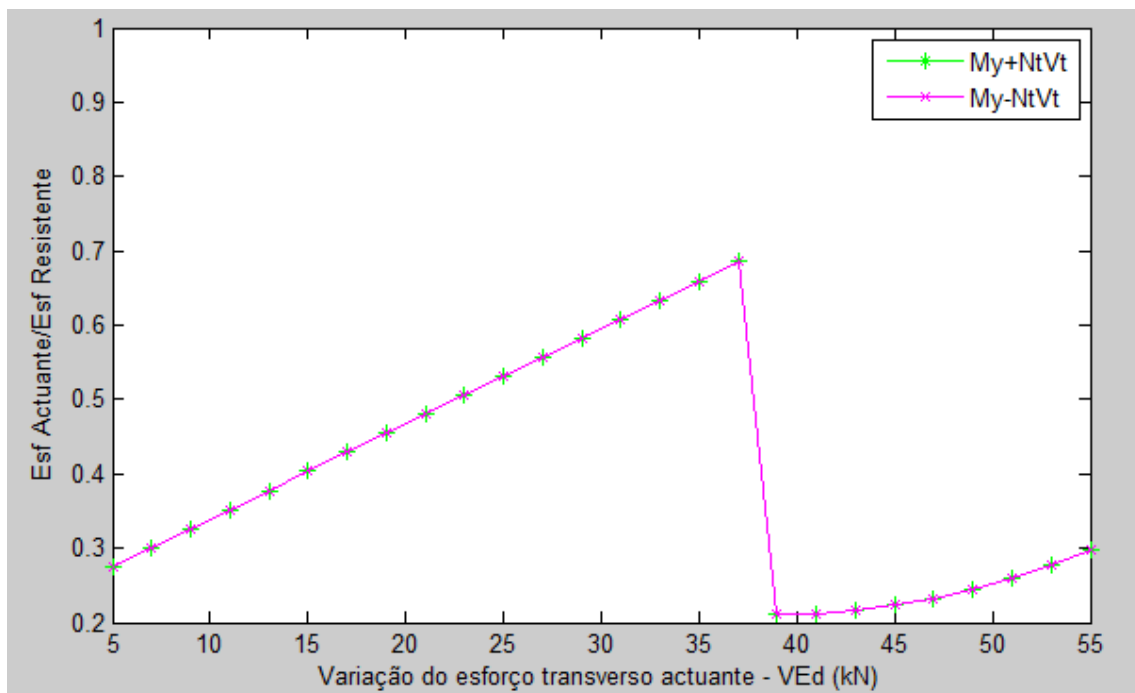


Figura 4.32 – Segurança à flexão composta com tração e esforço transversal, para esforço transversal variável.

- Resistência à flexão composta com compressão e esforço transversal

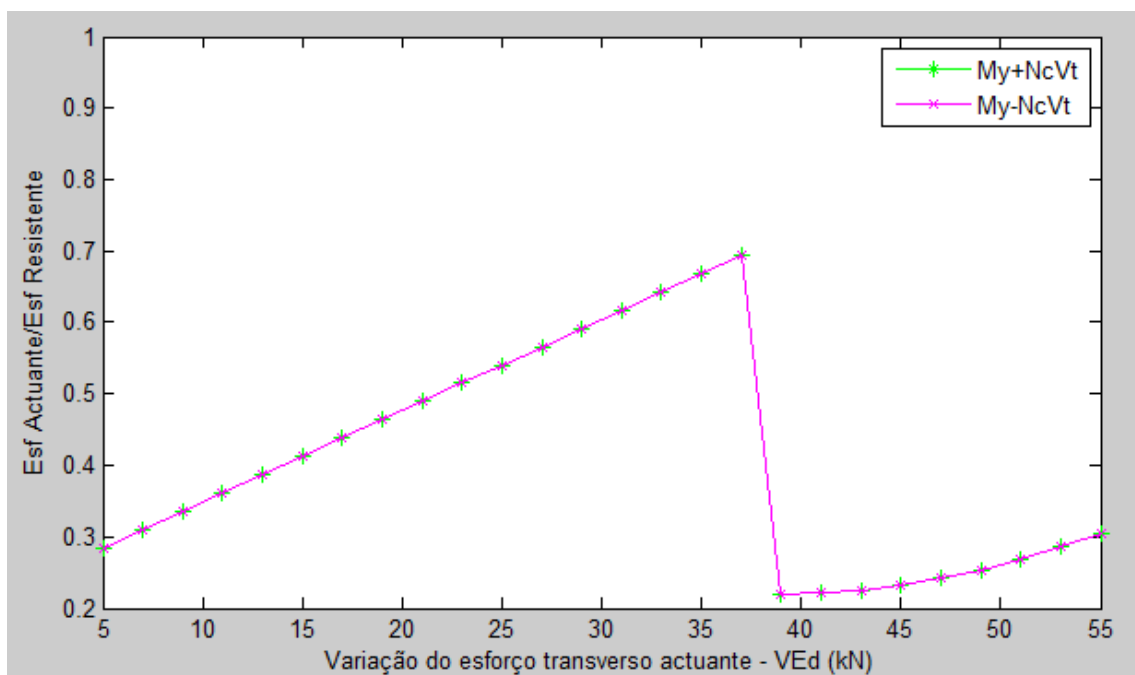


Figura 4.33 – Segurança à flexão composta com compressão e esforço transversal, para esforço transversal variável.

Analisando estas figuras, observa-se que a verificação de segurança à flexão desviada composta com tração/compressão e esforço transversal é assegurada desde o princípio. Verifica-se também

que existe uma zona de deflexão nas figuras que corresponde à transição de $V_{Ed} < 0,5V_{wRd}$ para $V_{Ed} > 0,5V_{wRd}$ pois, como se viu atrás no ponto 3.5.1.9 dependendo da relação V_{Ed}/V_{wRd} a equação referente à resistência à flexão desviada composta com tracção/compressão varia.

Tabela 4.4 – Variação do rácio de resistência à flexão composta com compressão e esforço transversal em função da variação do esforço transversal.

V_{Ed}	Resistência	V_{Ed}	Resistência	V_{Ed}	Resistência
5	0.2840	23	0.5148	41	0.2212
7	0.3097	25	0.5405	43	0.2253
9	0.3353	27	0.5661	45	0.2320
11	0.3610	29	0.5918	47	0.2414
13	0.3866	31	0.6174	49	0.2534
15	0.4123	33	0.6431	51	0.2682
17	0.4379	35	0.6687	53	0.2856
19	0.4635	37	0.6944	55	0.3057
21	0.4892	39	0.2199		

Valores a vermelho: $V_{Ed} < 0,5V_{wRd} \longrightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{|V_{Ed}|}{V_{w,Rd}}$

Valores a azul: $V_{Ed} > 0,5V_{wRd} \longrightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{|V_{Ed}|}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2$

4.5. Variação da força concentrada

Para efetuar esta análise, foram definidos os seguintes parâmetros:

- $N_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $V_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para a força concentrada com um valor mínimo de 2 kN, um valor máximo de 15 kN e uma variação de 0,5 kN entre valores sucessivos ($F_{Ed}=2, 2,5, \dots, 14,5, 15$ kN).

Definidos todos estes parâmetros, procedeu-se ao dimensionamento da secção. Os valores apresentados correspondem apenas à resistência às forças concentradas e à flexão desviada composta com tração ou compressão e forças concentradas pois são estas combinações que condicionam mais a verificação de segurança.

- Resistência a forças concentradas

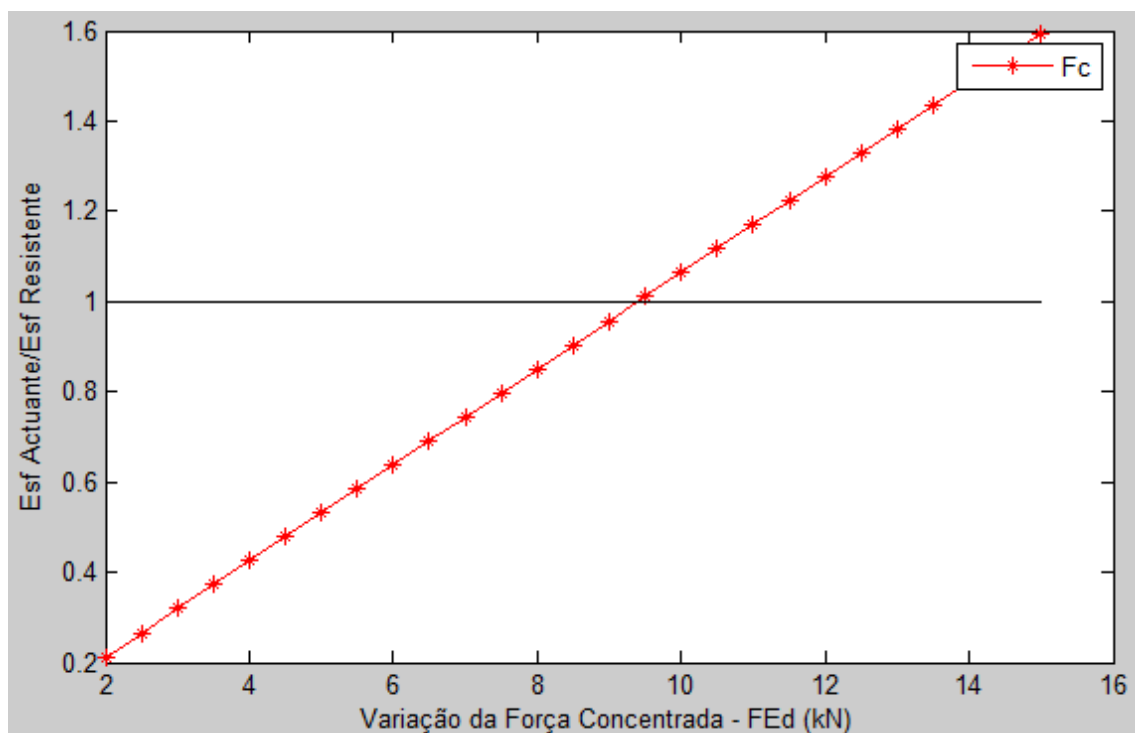


Figura 4.34 – Segurança a forças concentradas, para força concentrada variável.

Observando o gráfico da Figura 4.34, verifica-se que a segurança deixa de ser assegurada quando a força concentrada ultrapassa 9 kN, aproximadamente. Comparando a resistência a forças concentradas com a resistência à compressão verifica-se que os perfis enformados a frio são menos resistentes a forças concentradas pois, para a mesma secção, o valor de força concentrada resistente é menor que o correspondente esforço de compressão resistente.

- Resistência à flexão desviada e forças concentradas

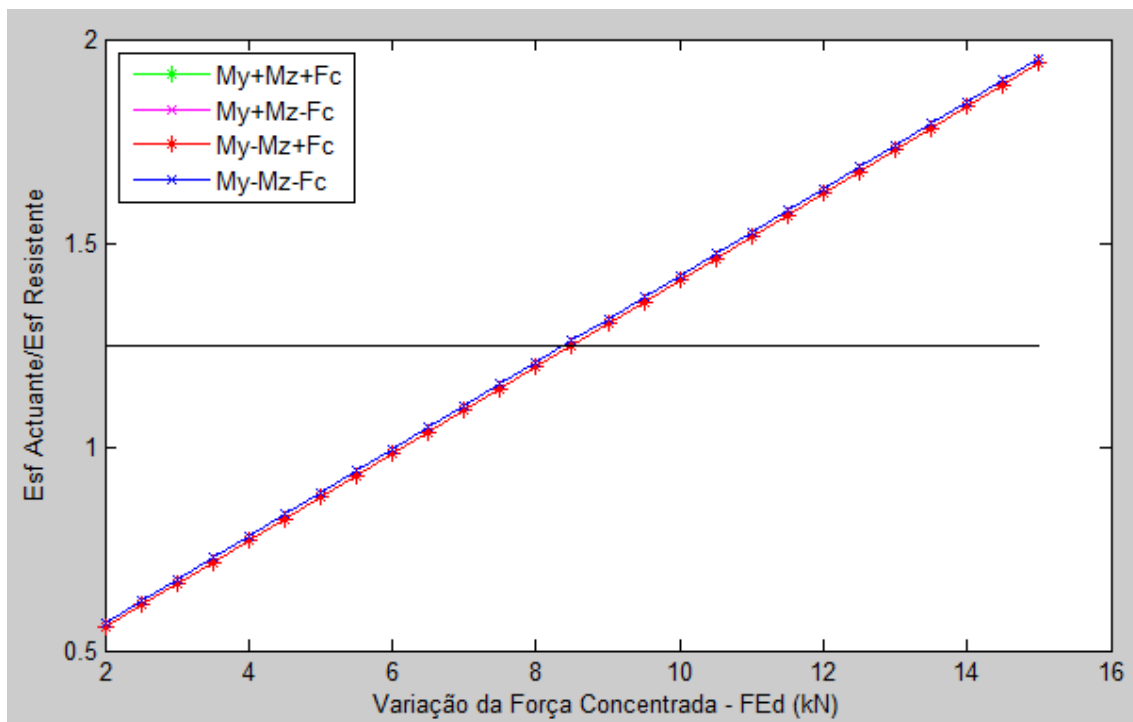


Figura 4.35 – Segurança à flexão desviada e forças concentradas, para força concentrada variável.

Comparando esta figura com a Figura 4.34 observa-se que a verificação de segurança à flexão desviada e forças concentradas deixa de ser assegurada para valores da força concentrada a partir de 8,5 kN, aproximadamente. Esta menor resistência é expectável, pois neste caso consideraram-se mais esforços a atuar em simultâneo.

4.6. Variação do momento flector segundo y

Para fazer esta análise foram definidos os seguintes parâmetros:

- $N_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $V_{Ed} = 5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,z} = 0,4 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para o momento fletor em torno de y com um valor mínimo de 2 kNm, um valor máximo de 10 kNm e uma variação de 0,5 kNm entre valores sucessivos ($M_{Ed,y}=2, 2,5, \dots, 9,5, 10 \text{ kNm}$).

Definidos todos estes parâmetros, procedeu-se ao dimensionamento da secção. Os valores apresentados correspondem apenas à resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1 e a EN1993-1-3 pois é esta combinação que condiciona mais a verificação de segurança.

- Resistência à encurvadura à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1

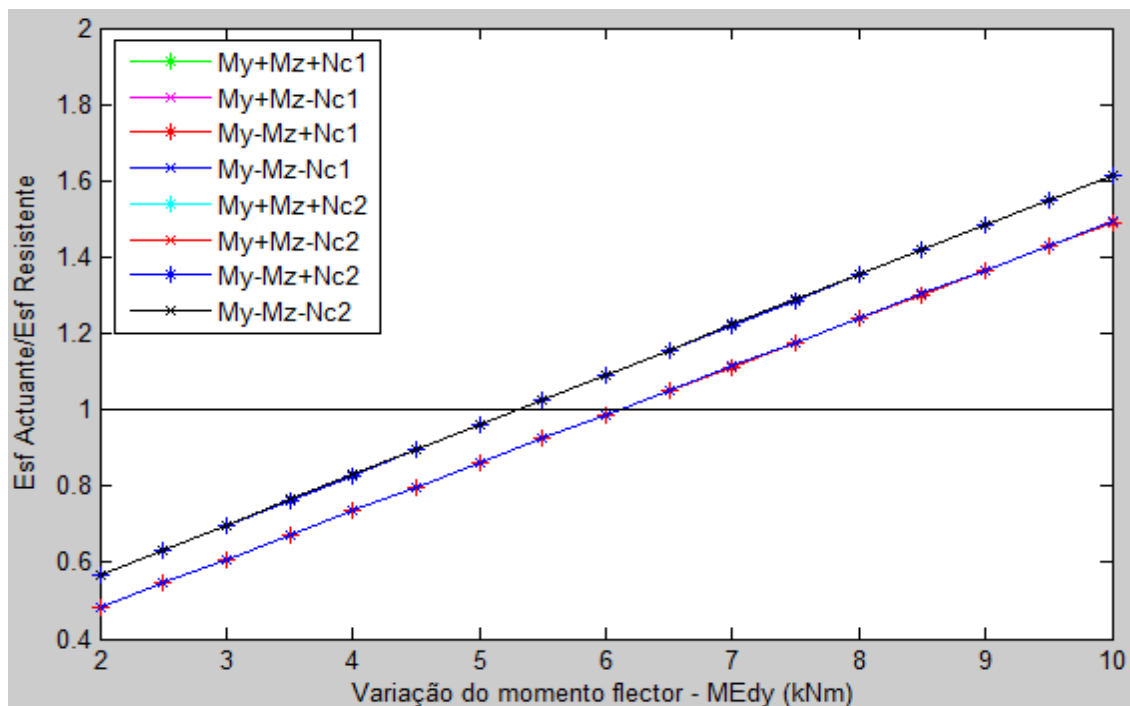


Figura 4.36 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3), para variação do momento fletor em torno de y.

- Resistência à encurvadura à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3

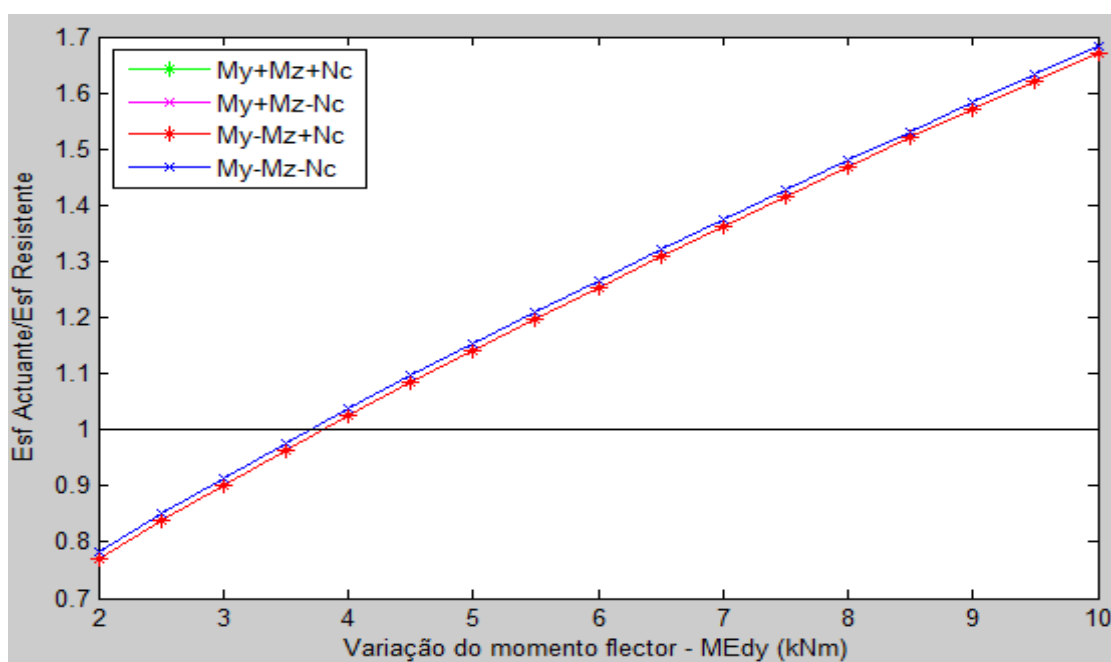


Figura 4.37 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3, para variação do momento fletor em torno de y.

Analisando os gráficos acima, é fácil perceber quando é que a segurança deixa de ser verificada. Os valores da Figura 4.37 são mais condicionantes que os da Figura 4.36, deixando a segurança de ser verificada para momentos fletores próximos de 4 kNm.

4.7. Variação do momento flector segundo z

Para efetuar esta análise, foram definidos os seguintes parâmetros:

- $N_{Ed} = 5 \text{ kN}$;
- $F_{Ed} = 3 \text{ kN}$;
- $V_{Ed} = 5 \text{ kNm}$;
- $M_{Ed,y} = 2,5 \text{ kNm}$;
- $b = 50 \text{ mm}$;
- $c = 30 \text{ mm}$;
- $h = 200 \text{ mm}$;
- $t = 2 \text{ mm}$.

Foi definido um vetor para o momento fletor em z com um valor mínimo de 0,4 kN, um valor máximo de 5 kN e uma variação de 0,2 kNm entre valores sucessivos ($M_{Ed,z}=0,4, 0,6, \dots, 4,8, 5 \text{ kNm}$).

Definidos todos estes parâmetros, procedeu-se ao dimensionamento da secção. Os valores apresentados correspondem apenas à resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1 e a EN1993-1-3 pois é esta combinação que condiciona mais a verificação de segurança.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-1

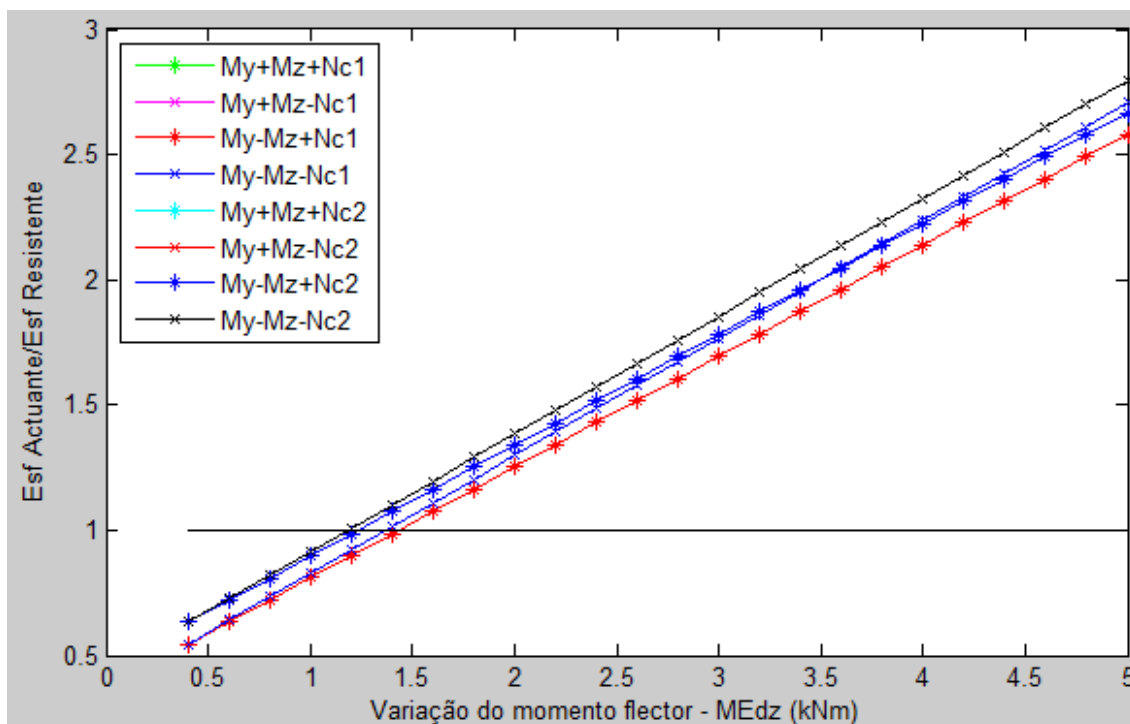


Figura 4.38 – Segurança à flexão desviada composta com compressão (os rácios terminados em 1 referem-se à primeira expressão e os terminados em 2 referem-se à segunda expressão indicada em 3.5.2.3), para variação do momento fletor em torno de z.

- Resistência à encurvadura em flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3

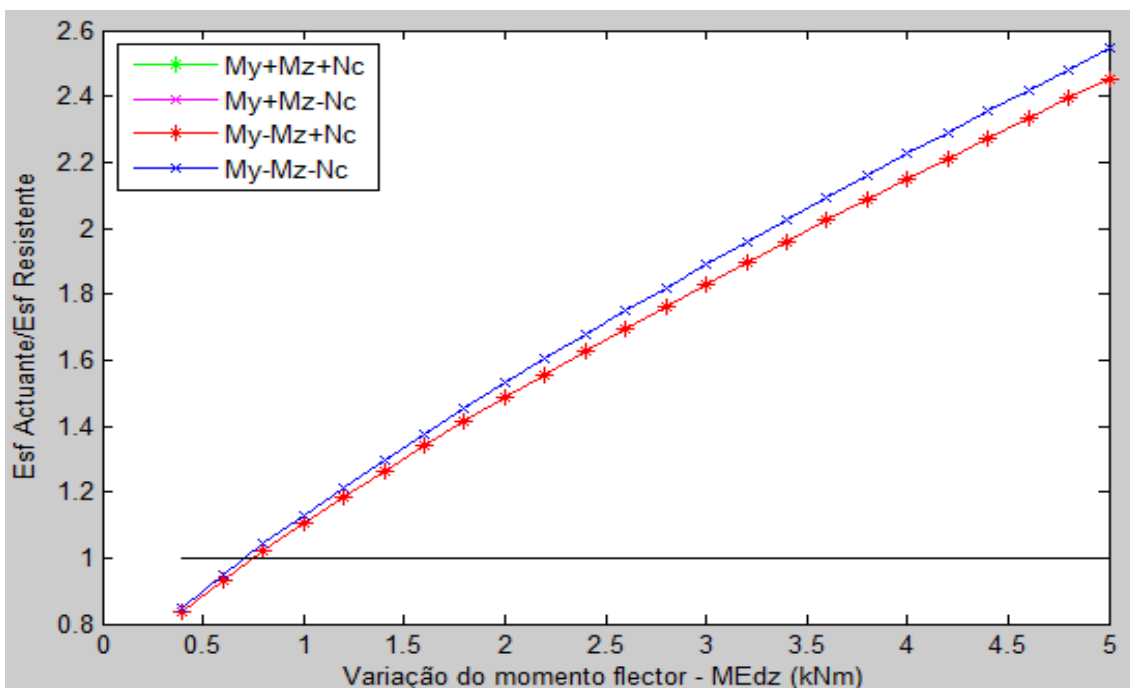


Figura 4.39 – Segurança à flexão desviada composta com compressão segundo a EN1993-1-3, para variação do momento fletor em torno de z.

Analisando os gráficos, percebe-se facilmente quando é que a segurança deixa de ser verificada. Os valores da Figura 4.39 são mais condicionantes que os da figura 4.38, deixando a segurança de ser verificada quando o momento fletor atinge cerca de 0,75 kNm. Confirma-se mais uma vez que a secção arbitrada não resiste a momentos fletores elevados, sendo que, para as dimensões adotadas, o máximo momento fletor em torno de z que verifica a segurança não excede 0,75 kNm.

5. Conclusões

Ao longo do último século, a construção metálica tem evoluído grandemente, apresentando diversas vantagens em relação a outros tipos de construção. No entanto, apesar desta evolução, a variedade de tipos de elementos estruturais de aço que se podem utilizar não é muito grande, sendo a maioria das construções metálicas executadas com base em elementos de aço laminado a quente. Efetivamente, a utilização de outros tipos de elementos é pouco frequente, em parte por falta de experiência e por falta de conhecimento dos projetistas. Os perfis de aço enformados a frio sofrem desse problema, visto as suas vantagens serem pouco conhecidas e os Eurocódigos que fornecem informações referentes ao seu dimensionamento não serem de fácil compreensão.

Os perfis enformados a frio, apesar do seu dimensionamento não ser fácil quando comparado com os elementos laminados a quente, oferecem algumas vantagens, sendo as principais a leveza dos elementos e a sua grande versatilidade de fabrico. O fato deste material apresentar uma grande eficiência estrutural, em termos de relação resistência-peso, torna-o bastante competitivo no mercado da construção, já com ele se podem obter estruturas muito leves e economicamente vantajosas. Assim, é importante que os perfis enformados a frio sejam encarados como uma forte alternativa a outros tipos de elementos metálicos mais usuais, sendo essencial que se dê maior destaque a este material tanto a nível académico como empresarial.

Para se poder proceder a um correto dimensionamento de um perfil de aço enformado a frio, há que caracterizar o seu comportamento estrutural e quantificar adequadamente os fenómenos inerentes à sua instabilização. Devido à elevada esbelteza das placas que compõem estes elementos, é comum a ocorrência de fenómenos de instabilidade globais e locais, cuja consideração no dimensionamento é algo complexa. A instabilidade local é caracterizada por dois modos, o local de placa e o distorcional, que são tidos em conta no cálculo da largura efetiva e da espessura efetiva. Estes cálculos de dimensões efetivas, necessários para a verificação da segurança a fenómenos de instabilidade, são geralmente efetuados de acordo com o Eurocódigo 3, envolvendo um processo sequencial e iterativo que torna o dimensionamento algo moroso.

O dimensionamento pode tornar-se mais ou menos complexo dependendo de algumas características da peça em estudo, tais como as condições de apoio da barra, as restrições que podem ou não existir nas extremidades, a geometria da secção, a existência de reforços de

extremidade ou intermédios. Estas características são importantes e podem tornar as verificações de segurança aos esforços atuantes mais trabalhosos.

Relativamente às verificações de segurança aos esforços atuantes, o Eurocódigo 3 é razoavelmente elucidativo e fácil de aplicar até ao ponto em que trata da resistência à encurvadura. Esta resistência está associada à instabilidade global que pode ocorrer por flexão, por torção ou por flexão/torção, em secções transversais mono-simétricas, ou por encurvadura lateral/torção. Para verificar a segurança à resistência à encurvadura é necessário recorrer às Partes 1-1 e 1-3 do Eurocódigo 3, visto que esta última parte, referente a perfis enformados a frio, apenas permite calcular a carga crítica elástica por torção e por torção/flexão. A EN1993-1-3 é relativamente restrita à instabilidade global pois no caso de barras está apenas direccionada para os casos mais simples em que a instabilidade ocorre por flexão, no entanto a instabilidade por flexão-torção é muito comum, visto a maioria das secções enformadas a frio serem mono-simétricas. No caso de vigas esta norma também é algo restrita pois está mais vocacionada para secções bi-simétricas ou mono-simétricas.

Tendo sido feito o dimensionamento para perfis enformados a frio segundo o Eurocódigo 3, foram apresentados alguns resultados, onde se variaram alguns parâmetros, como a altura da alma da secção, a espessura dos elementos e os valores dos esforços atuantes. Analisando esses resultados concluiu-se que as verificações de segurança às instabilidades globais são as mais condicionantes. Verifica-se também que, à medida que a área de secção aumenta, maior é a segurança, sendo que a espessura dos elementos assume maior importância do que a altura da alma. Com efeito, o aumento da espessura, para além de fazer aumentar a área da secção, faz reduzir a esbelteza dos elementos, o que atenua a importância da encurvadura. Relativamente à variação dos esforços atuantes, os resultados obtidos revelaram que as secções enformadas a frio resistem bem a esforços de compressão, esforços de tração e forças concentradas. O maior problema destes elementos é a sua baixa resistência à flexão, pois para valores razoavelmente reduzidos do momento fletor atuante, a segurança já não é verificada.

6. Bibliografia

- [1] European Committee for Standardization, CEN: "Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting", Março 2004, EN 1993-1-3.
- [2] European Committee for Standardization, CEN: "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements", English Version: EN1993-1-5 (October 2006).
- [3] Norma Portuguesa - "Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios", Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [4] European Committee for Standardization, CEN: "Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", Annex F, ENV 1993-1-1 (1992).
- [5] Reis A., Camotim D., "Estabilidade Estrutural", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, McGraw-Hill, 2001.
- [6] W.-W. Yu, Cold-Formed Design, John Wiley & Sons, Inc, Third Edition (2000), Chapter 3, pp 89-104.
- [7] Outinen J., Perttola H., Hara R., Kupari K., Kaitila O., "Seminar on Steel Structures: DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES", Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 15, Espoo 2000.
- [8] Tran T., Li L.-y., "Global optimization of cold-formed steel channel sections", School of Engineering and Applied Science, Aston University, Birmingham, UK: Thin-Walled Structures, 2006.
- [9] Azevedo A. F. M., "Optimização de Estruturas com Comportamento Linear e Não Linear" (Dissertação de Doutoramento), Porto, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 1994.
- [10] W.-W. Yu, "Cold-Formed Steel Design", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2000, Chapter 1, pp. 1-28.
- [11] D. P. Allen, "History of Cold Formed Steel", Building Blocks – discussion and updates on structural

materials, *Structure magazine*, 2006.

- [12] "Construction - Overview of Cold-Formed Steel in Building Construction", Cold Formed Steel Profile, 2010.
- [13] W.-W. Yu, "Cold-Formed Steel Structures", Structural Engineering Handbook, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [14] Gherzi A. R., Landolfo M., Mazzolani F., "Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Member", London and New York: SPON PRESS, Taylor & Francis Group.
- [15] Veríssimo H., "Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformado a frio de acordo com o Eurocódigo 3" (Dissertação de Mestrado), Instituto Superior Técnico: Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2008.
- [16] Lee J. H., "Local Buckling Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures", School of Civil Engineering - Queensland University of Technology, Maio 2004.
- [17] Heva Y. B., "Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures", School of Urban Developments - Queensland University of Technology, Março 2009.
- [18] tatasteelconstruction, [Online]. Available:
http://www.tatasteelconstruction.com/en/reference/teaching_resources/architectural_studio_reference/technology/cold_formed_steel/structural_behaviour_of_cold_formed_steel/. [Acedido em 03 02 2014].
- [19] Institute A. I. S., "Durability of Cold-Formed Steel Framing Members", Second Edition, Steel Framing Alliance, Setembro 2004.
- [20] Lamas Prof. A. R. G., "Mecânica Estrutural", Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [21] J. Outinen, H. Perttola, R. Hara, K. Kupari e O. Kaitila, Seminar on Steel Structures: DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, Helsinki: Helsinki University of Technology

Laboratory of Steel Structures Publications 15, 2000.

- [22] Pinto A. E. M. R., "Estabilidade Local de Perfis de Aço Enformados a Frio" (Dissertação de Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2010.
- [23] Barreta C. E. A. S., "Interação entre instabilidade local-de-placa e distorcional em colunas de aço enformadas a frio de secção em Z" (Dissertação de Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Junho 2011.
- [24] Castelani T., "Otimização e dimensionamento de perfis formados a frio pelo método da resistência direta" (Tese de Mestrado), Ministério da Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro 2012.
- [25] J. H. U. Schafer Ben, "Thin-walled Structures" 11 Março 2014. [Online]. Available: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm>.
- [26] Fena R. P. T., "Interação entre instabilidade local e distorcional em colunas de aço enformadas a frio de secção em "Hat" " (Dissertação de Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Dezembro 2011.
- [27] Gervásio H., da Silva L. S., Simão P., "Dimensionamento de elementos metálicos com perfis enformados a frio de acordo com a parte 1.3 do Eurocódigo 3", Lisboa: IV Congresso de Construção metálica e mista, Dezembro 2003.
- [28] W.-W. Yu, "Cold-Formed Design", John Wiley & Sons, Inc, Third Edition (2000), pp 89-104.
- [29] A. Vodopivec, "wxMaxima", 11 Março 2014. [Online]. Available: <http://andrejv.github.io/wxmaxima/>.
- [30] D. M. F. HAMA, "Introduction to Matlab", 2 de Março 2010.
- [31] "made in china," [Online]. Available: <http://www.made-in-china.com/showroom/lmyxjx/product-detailPqDQklzJYgcw/China-Cold-Roll-Forming-Machine-LM-688-.html>. [Acedido em Abril 2013].
- [32] csiportugal,[Online].Available: http://www.csiportugal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=169&Itemid=214&lang=pt. [Acedido em Novembro 2013].

ANEXOS

Nestes anexos será apresentada a análise feita através do Matlab para o cálculo de dimensionamento de uma secção de aço enformada a frio com geometria em C com variação da altura da alma e correspondentes verificações de segurança. É apenas apresentada a análise para a variação da altura da alma da secção visto as outras análises feitas serem relativamente semelhantes a nível de cálculo.

```

E=210000;
Ly=3000;
Lz=3000;
Lw=3000;
fy=350;
fu=500;
tnom=input('Introduza um valor para a espessura - tnom (maior que 1 e
menor que 6): ');
t=tnom-0.04;
h=70:10:300;
b=input('Introduza um valor para a largura - b: ');
if b > 60*t
    disp('Número muito grande, não verifica a condição de segurança')
    b=input('Introduza um valor menor (b<60t) para a largura - b: ')
else
    disp('OK')
end;
c=input('Introduza um valor para o reforço - c: ');
if c > 50*t
    disp('Número muito grande, não verifica a condição de segurança')
    c=input('Introduza um valor menor (c<50t) para o reforço - c: ')
else
    disp('OK')
end;
r=t;
alfa=90; % Ângulo interno dos cantos da secção
gr=(1+t/2)*(tan(pi*(alfa/2)/180)-sin(pi*(alfa/2)/180));
hs=h-t;
bs=b-t;
cs=c-t/2;
hp=hs-2*gr;
bp=bs-2*gr;
cp=cs-gr;
Factcorr=0.43.*((4*r)./(hp+2*bp+2*cp));
Area=(hp.*t+bp.*t+cp.*t*2).*(1-Factcorr);
z0=cp+gr;
z1=gr;
z2=0;
z3=0;
z4=gr;
z5=gr+hp;
z6=z5+gr;
z7=z6;
z8=z7-gr;
z9=z8-cp;
y0=bp+2*gr;
y1=y0;
y2=y1-gr;
y3=y2-bp;
y4=0;
y5=0;
y6=gr;
y7=y6+bp;

```

```

y8=y7+gr;
y9=y8;
A0=cp.*t;
A1=bp.*t;
A2=hp.*t;
A3=bp.*t;
A4=cp.*t;
Sy0=((z0+z1).*(A0/2)+(z2+z3).*(A1/2)+(z4+z5).*(A2/2)+(z6+z7).*(A3/2)+(
z8+z9).*(A4/2));
Sz0=((y0+y1).*(A0/2)+(y2+y3).*(A1/2)+(y4+y5).*(A2/2)+(y6+y7).*(A3/2)+(
y8+y9).*(A4/2));
Iy0=((z0.^2)+(z1.^2)+z0.*z1).*(A0/3)+((z2.^2)+(z3.^2)+z2.*z3).*(A1/3)+
((z4.^2)+(z5.^2)+z4.*z5).*(A2/3)+((z6.^2)+(z7.^2)+z6.*z7).*(A3/3)+((z8
.^2)+(z9.^2)+z8.*z9).*(A4/3);
Iz0=((y0.^2)+(y1.^2)+y0.*y1).*(A0/3)+((y2.^2)+(y3.^2)+y2.*y3).*(A1/3)+
((y4.^2)+(y5.^2)+y4.*y5).*(A2/3)+((y6.^2)+(y7.^2)+y6.*y7).*(A3/3)+((y8
.^2)+(y9.^2)+y8.*y9).*(A4/3);
Iyz0=((2*y0.*z0+2*y1.*z1+y0.*z1+y1.*z0).*(A0/6)+(2*y2.*z2+2*y3.*z3+y2.
*z3+y3.*z2).*(A1/6)+(2*y4.*z4+2*y5.*z5+y4.*z5+y5.*z4).*(A2/6)+(2*y6.*z
6+2*y7.*z7+y6.*z7+y7.*z6).*(A3/6)+(2*y8.*z8+2*y9.*z9+y8.*z9+y9.*z8).*(
A4/6));
It=((A0+A1+A2+A3+A4).*(t^2))/3;
w01=-(y0.*z1-y1.*z0);
w02=-(y2.*z3-y3.*z2);
w03=-(y4.*z5-y5.*z4);
w04=-(y6.*z7-y7.*z6);
w05=-(y8.*z9-y9.*z8);
w0=0;
w2=w01+w0;
w4=w02+w2;
w6=w03+w4;
w8=w04+w6;
w1=w01+w0;
w3=w02+w2;
w5=w03+w4;
w7=w04+w6;
w9=w05+w8;
Iyw0=((2*y0.*w0+2*y1.*w1+y0.*w1+y1.*w0).*(A0/6)+(2*y2.*w2+2*y3.*w3+y2.
*w3+y3.*w2).*(A1/6)+(2*y4.*w4+2*y5.*w5+y4.*w5+y5.*w4).*(A2/6)+(2*y6.*w
6+2*y7.*w7+y6.*w7+y7.*w6).*(A3/6)+(2*y8.*w8+2*y9.*w9+y8.*w9+y9.*w8).*(
A4/6));
Izw0=((2*z0.*w0+2*z1.*w1+z0.*w1+z1.*w0).*(A0/6)+(2*z2.*w2+2*z3.*w3+z2.
*w3+z3.*w2).*(A1/6)+(2*z4.*w4+2*z5.*w5+z4.*w5+z5.*w4).*(A2/6)+(2*z6.*w
6+2*z7.*w7+z6.*w7+z7.*w6).*(A3/6)+(2*z8.*w8+2*z9.*w9+z8.*w9+z9.*w8).*(
A4/6));
Iww0=((w0.^2)+(w1.^2)+w0.*w1).*(A0/3)+((w2.^2)+(w3.^2)+w2.*w3).*(A1/3)+
((w4.^2)+(w5.^2)+w4.*w5).*(A2/3)+((w6.^2)+(w7.^2)+w6.*w7).*(A3/3)+((w
8.^2)+(w9.^2)+w8.*w9).*(A4/3);
IW=((w0+w1).*(A0/2)+(w2+w3).*(A1/2)+(w4+w5).*(A2/2)+(w6+w7).*(A3/2)+(w
8+w9).*(A4/2));
zcg=Sy0./Area;
ycg=Sz0./Area;
Iy=(Iy0-Area.*(zcg.^2)).*(1-2*Factcorr);
Iz=(Iz0-Area.*(ycg.^2)).*(1-2*Factcorr);
Iyz=Iyz0-(Sy0.*Sz0)./Area;
Iyw=Iyw0-(IW.*Sz0)./Area;
Izw=Izw0-(IW.*Sy0)./Area;
Iww=Iww0-(IW.^2)./Area;
ysc=-(Izw.*Iz-Iyw.*Iyz)./(Iy.*Iz-Iyz.^2);
zsc=(Iyw.*Iy-Izw.*Iyz)./(Iy.*Iz-Iyz.^2);
Iw=(Iww+zsc.*Iyw-ysc.*Izw).*(1-2*Factcorr);

```

```

ys=ysc-ycg;
zs=zsc-zcg;
Ip=Iy+Iz+Area.*((ys.^2)+(zs.^2));

%%Secção sujeita à compressão (em secções sujeitas à compressão psi
assume o valor de 1)
%%Classificação das secções
epsilon=(235/fy)^0.5;

Almac = hp;
if hp./t < 38*epsilon
    disp('Alma sujeita a compressão - Classe 2')
elseif hp./t < 42*epsilon
    disp('Alma sujeita a compressão - Classe 3')
else
    disp('Alma sujeita a compressão - Classe 4')
end;

Banzoc = bp;
if bp./t < 38*epsilon
    disp('Banzo sujeito a compressão - Classe 2')
elseif bp./t < 42*epsilon
    disp('Banzo sujeito a compressão - Classe 3')
else
    disp('Banzo sujeito a compressão - Classe 4')
end;

Reforcoc = cp;
if cp./t < 10*epsilon
    disp('Reforço sujeito a compressão - Classe 2')
elseif cp./t < 14*epsilon
    disp('Reforço sujeito a compressão - Classe 3')
else
    disp('Reforço sujeito a compressão - Classe 4')
end;

%%Seccoes efectivas
%%Alma
psicompalma=1;
ksigmacompalma=8.2/(1.05+psicompalma);
lambdapcompalma=(hp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmacompalma^0.5));

LA1=(lambdapcompalma>0.673);
LA2=(lambdapcompalma<0.673);
lambdapcompalma1=(LA1.*lambdapcompalma)+LA2;
rocompalma1=((lambdapcompalma1-
0.055*(3+psicompalma))/(lambdapcompalma1.^2)).*LA1;
lambdapcompalma2=LA2.*lambdapcompalma;
rocompalma2=LA2;
rocompalma=rocompalma1+rocompalma2;

heff=rocompalma.*hp;

%%Banzo
psicompban=1;
ksigmacompban=8.2/(1.05+psicompalma);
lambdapcompban=(bp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmacompban^0.5));

LB1=(lambdapcompban>0.673);
LB2=(lambdapcompban<0.673);

```

```

lambdapcompban1=(LB1.*lambdapcompban)+LB2;
rocompban11=((lambdapcompban1-
0.055*(3+psicompban))./(lambdapcompban1.^2)).*LB1;
lambdapcompban2=LB2.*lambdapcompban;
rocompban12=LB2;
rocompban=rocompban11+rocompban12;

beff=rocompban.*bp;

%%Reforço
LK1=(cp./bp<0.35);
ksigmacompref1=0.5*LK1;
LK2=(cp./bp>0.35);
ksigmacompref2=0.5+0.83*(((cp./bp)/LK2-0.35).^2).^(1/3));
ksigmacompref=ksigmacompref1+ksigmacompref2;

lambdapcompref=(cp./t)./(28.4*epsilon*(ksigmacompref.^0.5));

LR1=(lambdapcompref>0.748);
LR2=(lambdapcompref<0.748);
lambdapcompref1=(LR1.*lambdapcompref)+LR2;
rocompref11=((lambdapcompref1-0.188)./(lambdapcompref1.^2)).*LR1;
lambdapcompref2=LR2.*lambdapcompref;
rocompref12=LR2;
rocompref=rocompref11+rocompref12;

ceff=rocompref.*cp;

%%Cálculo da espessura reduzida do reforço
%1ª Iteração
z1c1=gr;
z2c1=gr+ceff;
z3c1=0;
z4c1=0;
y1c1=2*gr+bp;
y2c1=y1c1;
y3c1=y2c1-gr;
y4c1=y3c1-beff/2;
A0c1=ceff.*t;
A1c1=(beff/2).*t;
Sy0c1=((z1c1+z2c1).*(A0c1/2)+(z3c1+z4c1).*(A1c1/2));
Sz0c1=((y1c1+y2c1).*(A0c1/2)+(y3c1+y4c1).*(A1c1/2));
Iy0c1=((z1c1.^2)+(z2c1.^2)+z1c1.*z2c1).*(A0c1/3)+((z3c1.^2)+(z4c1.^2)+
z3c1.*z4c1).*(A1c1/3);
Iz0c1=((y1c1.^2)+(y2c1.^2)+y1c1.*y2c1).*(A0c1/3)+((y3c1.^2)+(y4c1.^2)+
y3c1.*y4c1).*(A1c1/3);
zcg1=Sy0c1./(A0c1+A1c1);
ycg1=Sz0c1./(A0c1+A1c1);
Iyc1=Iy0c1-(A0c1+A1c1).*(zcg1.^2);
Izc1=Iz0c1-(A0c1+A1c1).*(ycg1.^2);
Kc1=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-
0.3^2)).*(1./((ycg1.^2).*hp+(ycg1.^3)+0.5*ycg1.*ycg1.*hp.*1));
tensaocrstc1=2*((210*(10^3)).*Kc1.*Iyc1).^0.5)./(A0c1+A1c1);
esbeltezadc1=(fy./tensaocrstc1).^0.5;

Lesbclit1=(esbeltezadc1<0.65);
Lesbclit2=(esbeltezadc1>1.38);
Lesbclit3=(esbeltezadc1<1.38);
coefredc11=Lesbclit1.*1;

```



```

coefredc12=(0.66./((esbeltezaadcl.*Lesbclit2)+Lesbclit1+Lesbclit3)).*Lesbclit2;
coefredc13=(1.47-0.723*(esbeltezaadcl.*(Lesbclit3-Lesbclit1))).*(Lesbclit3-Lesbclit1);
coefredc1=coefredc11+coefredc12+coefredc13;

tensaocompEdc1=coefredc1*fy;
tredc1=coefredc1.*t;

%%2ª Iteração
%%Banzo
lambdapcompbanred2=lambdapcompban.*(tensaocompEdc1/fy).^0.5);
rocompban21=((1-0.055*(3+psicompban)./lambdapcompbanred2)./(lambdapcompbanred2)+0.18*(lambdapcompban1-lambdapcompbanred2)./(lambdapcompban1-0.6))).*LB1;
rocompban22=LB2;
rocompban2=rocompban21+rocompban22;

LB2it1=(rocompban2 <= 1);
bp1compban21=(rocompban2.*LB2it1).*bp*0.5;
LB2it2=(rocompban2 > 1);
bp1compban22=(bp.*LB2it2)*0.5;
bp1compban2=bp1compban21+bp1compban22;

bp2compban2= 0.5*beff;
bp1compban2= bp-bp1compban2-bp2compban2;

%%Reforço
lambdapcomprefred2=lambdapcompref.*(tensaocompEdc1/fy).^0.5);
rocompref21=((1-0.188./lambdapcomprefred2)./(lambdapcomprefred2)+0.18*(lambdapcompref1-lambdapcomprefred2)./(lambdapcompref1-0.6))).*LR1;
rocompref22=LR2;
rocompref2=rocompref21+rocompref22;

LR2it1=(rocompref2 <= 1);
cp1compref21=(rocompref2.*LR2it1).*cp;
LR2it2=(rocompref2 > 1);
cp1compref22=(cp.*LR2it2);
cp1compref2=cp1compref21+cp1compref22;

cp1compref2=cp-cp1compref2;

%%Cálculo da espessura reduzida do reforço
z1c2=gr;
z2c2=gr+cp1compref2;
z3c2=0;
z4c2=0;
y1c2=2*gr+bp;
y2c2=y1c2;
y3c2=y2c2-gr;
y4c2=y3c2-bp1compban2;
A0c2=(z2c2-z1c2).*t;
A1c2=(y3c2-y4c2).*t;
Sy0c2=((z1c2+z2c2).*(A0c2/2)+(z3c2+z4c2).*(A1c2/2));
Sz0c2=((y1c2+y2c2).*(A0c2/2)+(y3c2+y4c2).*(A1c2/2));
Iy0c2=((z1c2.^2)+(z2c2.^2)+z1c2.*z2c2).*(A0c2/3)+((z3c2.^2)+(z4c2.^2)+z3c2.*z4c2).*(A1c2/3);
Iz0c2=((y1c2.^2)+(y2c2.^2)+y1c2.*y2c2).*(A0c2/3)+((y3c2.^2)+(y4c2.^2)+y3c2.*y4c2).*(A1c2/3);

```

```

zcgc2=Sy0c2./(A0c2+A1c2);
ycgc2=Sz0c2./(A0c2+A1c2);
Iyc2=Iy0c2-(A0c2+A1c2).*(zcgc2.^2);
Izc2=Iz0c2-(A0c2+A1c2).*(ycgc2.^2);
Kc2=((210*(10^3))*(t.^3))./(4*(1-0.3^2))).*(1./((ycgc2.^2).*hp+(ycgc2.^3)+0.5*ycgc2.*ycgc2.*hp.*1));
tensaocrstc2=2*((210*(10^3))*Kc2.*Iyc2).^0.5)./(A0c2+A1c2);
esbeltezadc2=(fy./tensaocrstc2).^0.5;

Lesbc2it1=(esbeltezadc2<0.65);
Lesbc2it2=(esbeltezadc2>1.38);
Lesbc2it3=(esbeltezadc2<1.38);
coefredc21=Lesbc2it1.*1;
coefredc22=(0.66./((esbeltezadc2.*Lesbc2it2)+Lesbc2it1+Lesbc2it3)).*Lesbc2it2;
coefredc23=(1.47-0.723*(esbeltezadc2.*(Lesbc2it3-Lesbc2it1))).*(Lesbc2it3-Lesbc2it1);
coefredc2=coefredc21+coefredc22+coefredc23;

variacaocoefredc2=coefredc2-coefredc1;
Qcoefredc2=coefredc2./coefredc1;
tensaocompEdc2=coefredc2*fy;
tredc2=coefredc2.*t;

%%3ª Iteração
%%Banzo
lambdapcompbanred3=lambdapcompban.*((tensaocompEdc2/fy).^0.5);
rocompban31=((1-0.055*(3+psicompan)./(lambdapcompbanred3)./(lambdapcompbanred3)+0.18*(lambdapcompban1-lambdapcompbanred3)./(lambdapcompban1-0.6))).*LB1;
rocompban32=LB2;
rocompban3=rocompban31+rocompban32;

LB3it1=(rocompban3 <= 1);
bp1compban31=(rocompban3.*LB3it1).*bp*0.5;
LB3it2=(rocompban3 > 1);
bp1compban32=(bp.*LB3it2)*0.5;
bp1compban3=bp1compban31+bp1compban32;

bp2compban3= 0.5*beff;
bp1compban3= bp-bp1compban3-bp2compban3;

%%Reforço
lambdapcomprefred3=lambdapcompref.*((tensaocompEdc2/fy).^0.5);
rocompref31=((1-0.188./lambdapcomprefred3)./(lambdapcomprefred3)+0.18*(lambdapcompref1-lambdapcomprefred3)./(lambdapcompref1-0.6))).*LR1;
rocompref32=LR2;
rocompref3=rocompref31+rocompref32;

LR3it1=(rocompref3 <= 1);
cp1compref31=(rocompref3.*LR3it1).*cp;
LR3it2=(rocompref3 > 1);
cp1compref32=(cp.*LR3it2);
cp1compref3=cp1compref31+cp1compref32;

cp1compref3=cp-cp1compref3;

%%Cálculo da espessura reduzida do reforço
zlc3=gr;

```

```

z2c3=gr+cp1compref3;
z3c3=0;
z4c3=0;
y1c3=2*gr+bp;
y2c3=y1c3;
y3c3=y2c3-gr;
y4c3=y3c3-bp1compban3;
A0c3=(z2c3-z1c3).*t;
A1c3=(y3c3-y4c3).*t;
Sy0c3=((z1c3+z2c3).*(A0c3/2)+(z3c3+z4c3).*(A1c3/2));
Sz0c3=((y1c3+y2c3).*(A0c3/2)+(y3c3+y4c3).*(A1c3/2));
Iy0c3=((z1c3.^2)+(z2c3.^2)+z1c3.*z2c3).*(A0c3/3)+((z3c3.^2)+(z4c3.^2)+
z3c3.*z4c3).*(A1c3/3);
Iz0c3=((y1c3.^2)+(y2c3.^2)+y1c3.*y2c3).*(A0c3/3)+((y3c3.^2)+(y4c3.^2)+
y3c3.*y4c3).*(A1c3/3);
zcgc3=Sy0c3./(A0c3+A1c3);
ycgc3=Sz0c3./(A0c3+A1c3);
Iyc3=Iy0c3-(A0c3+A1c3).*(zcgc3.^2);
Izc3=Iz0c3-(A0c3+A1c3).*(ycgc3.^2);
Kc3=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-
0.3^2))).*(1./((ycgc3.^2).*hp+(ycgc3.^3)+0.5*ycgc3.*ycgc3.*hp.*1));
tensaocrstc3=2*((210*(10^3)).*Kc3.*Iyc3).^0.5)./(A0c3+A1c3);
esbeltezadc3=(fy./tensaocrstc3).^0.5;

Lesbc3it1=(esbeltezadc3<0.65);
Lesbc3it2=(esbeltezadc3>1.38);
Lesbc3it3=(esbeltezadc3<1.38);
coefredc31=Lesbc3it1.*1;
coefredc32=(0.66./((esbeltezadc3.*Lesbc3it2)+Lesbc3it1+Lesbc3it3)).*Le
sbc3it2;
coefredc33=(1.47-0.723*(esbeltezadc3.*(Lesbc3it3-
Lesbc3it1))).*(Lesbc3it3-Lesbc3it1);
coefredc3=coefredc31+coefredc32+coefredc33;

variacaocoefredc3=coefredc3-coefredc2;
Qcoefredc3=coefredc3./coefredc2;
tensaocompEdc3=coefredc3*fy;
tredc3=coefredc3.*t;

%%4ª Iteração
%%Banzo
lambdapcompbanred4=lambdapcompban.*((tensaocompEdc3/fy).^0.5);
rocompban41=((1-
0.055*(3+psicompban)./lambdapcompbanred4)./(lambdapcompbanred4)+0.18*(
(lambdapcompban1-lambdapcompbanred4)./(lambdapcompban1-0.6))).*LB1;
rocompban42=LB2;
rocompban4=rocompban41+rocompban42;

LB4it1=(rocompban4 <= 1);
bp1compban41=(rocompban4.*LB4it1).*bp*0.5;
LB4it2=(rocompban4 > 1);
bp1compban42=(bp.*LB4it2)*0.5;
bp1compban4=bp1compban41+bp1compban42;

bp2compban4= 0.5*beff;
bp1compban4=bp-bp1compban4-bp2compban4;

%%Reforço
lambdapcomprefred4=lambdapcompref.*((tensaocompEdc3/fy).^0.5);

```

```

rocompref41=((1-
0.188./lambdapcomprefred4)./(lambdapcomprefred4)+0.18*((lambdapcompref
1-lambdapcomprefred4)./(lambdapcompref1-0.6))).*LR1;
rocompref42=LR2;
rocompref4=rocompref41+rocompref42;

LR4it1=(rocompref4 <= 1);
cplcompref41=(rocompref4.*LR4it1).*cp;
LR4it2=(rocompref4 > 1);
cplcompref42=(cp.*LR4it2);
cplcompref4=cplcompref41+cplcompref42;

cpicompref4=cp-cplcompref4;

%%Cálculo da espessura reduzida do reforço
z1c4=gr;
z2c4=gr+cplcompref4;
z3c4=0;
z4c4=0;
y1c4=2*gr+bp;
y2c4=y1c4;
y3c4=y2c4-gr;
y4c4=y3c4-bp1compban4;
A0c4=(z2c4-z1c4).*t;
A1c4=(y3c4-y4c4).*t;
Sy0c4=((z1c4+z2c4).*(A0c4/2)+(z3c4+z4c4).*(A1c4/2));
Sz0c4=((y1c4+y2c4).*(A0c4/2)+(y3c4+y4c4).*(A1c4/2));
Iy0c4=((z1c4.^2)+(z2c4.^2)+z1c4.*z2c4).*(A0c4/3)+((z3c4.^2)+(z4c4.^2)+
z3c4.*z4c4).*(A1c4/3);
Iz0c4=((y1c4.^2)+(y2c4.^2)+y1c4.*y2c4).*(A0c4/3)+((y3c4.^2)+(y4c4.^2)+
y3c4.*y4c4).*(A1c4/3);
zcg4=Sy0c4./(A0c4+A1c4);
ycg4=Sz0c4./(A0c4+A1c4);
Iyc4=Iy0c4-(A0c4+A1c4).*(zcg4.^2);
Izc4=Iz0c4-(A0c4+A1c4).*(ycg4.^2);
Kc4=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-
0.3^2)).*(1./((ycg4.^2).*hp+(ycg4.^3)+0.5*ycg4.*ycg4.*hp.*1));
tensaocrstc4=2*((210*(10^3)).*Kc4.*Iyc4).^0.5./(A0c4+A1c4);
esbeltezadc4=(fy./tensaocrstc4).^0.5;

Lesbc4it1=(esbeltezadc4<0.65);
Lesbc4it2=(esbeltezadc4>1.38);
Lesbc4it3=(esbeltezadc4<1.38);
coefredc41=Lesbc4it1.*1;
coefredc42=(0.66./((esbeltezadc4.*Lesbc4it2)+Lesbc4it1+Lesbc4it3)).*Le
sbc4it2;
coefredc43=(1.47-0.723*(esbeltezadc4.*(Lesbc4it3-
Lesbc4it1))).*(Lesbc4it3-Lesbc4it1);
coefredc4=coefredc41+coefredc42+coefredc43;

variacaocofredc4=coefredc4-cofredc3;
Qcofredc4=coefredc4./cofredc3;
tensaocompEdc4=coefredc4*fy;
tredc4=coefredc4.*t;

%%Cálculo das características finais da secção efectiva
z0cf=gr+cplcompref4;
z1cf=gr;
z2cf=0;
z3cf=0;

```

```

z4cf=0;
z5cf=0;
z6cf=gr;
z7cf=z6cf+heff/2;
z8cf=z7cf+hp-heff;
z9cf=gr+hp;
z10cf=hp+2*gr;
z11cf=hp+2*gr;
z12cf=hp+2*gr;
z13cf=hp+2*gr;
z14cf=gr+hp;
z15cf=gr+hp-cp1compref4;
y0cf=2*gr+bp;
y1cf=2*gr+bp;
y2cf=gr+bp;
y3cf=y2cf-bp1compban4;
y4cf=y3cf-bpicompban4;
y5cf=y4cf-bp2compban4;
y6cf=0;
y7cf=0;
y8cf=0;
y9cf=0;
y10cf=gr;
y11cf=y10cf+bp2compban4;
y12cf=y11cf+bpicompban4;
y13cf=gr+bp;
y14cf=2*gr+bp;
y15cf=2*gr+bp;
A0cf=(z0cf-z1cf).*tredc4;
A1cf=(y2cf-y3cf).*tredc4;
A2cf=(y4cf-y5cf).*t;
A3cf=(z7cf-z6cf).*t;
A4cf=(z9cf-z8cf).*t;
A5cf=(y11cf-y10cf).*t;
A6cf=(y13cf-y12cf).*tredc4;
A7cf=(z14cf-z15cf).*tredc4;
Sy0cf=((z0cf+z1cf).*(A0cf/2)+(z2cf+z3cf).*(A1cf/2)+(z4cf+z5cf).*(A2cf/2)+(z6cf+z7cf).*(A3cf/2)+(z8cf+z9cf).*(A4cf/2)+(z10cf+z11cf).*(A5cf/2)+(z12cf+z13cf).*(A6cf/2)+(z14cf+z15cf).*(A7cf/2));
Sz0cf=((y0cf+y1cf).*(A0cf/2)+(y2cf+y3cf).*(A1cf/2)+(y4cf+y5cf).*(A2cf/2)+(y6cf+y7cf).*(A3cf/2)+(y8cf+y9cf).*(A4cf/2)+(y10cf+y11cf).*(A5cf/2)+(y12cf+y13cf).*(A6cf/2)+(y14cf+y15cf).*(A7cf/2));
Iy0cf=((z0cf.^2)+(z1cf.^2)+z0cf.*z1cf).*(A0cf/3)+((z2cf.^2)+(z3cf.^2)+z2cf.*z3cf).*(A1cf/3)+((z4cf.^2)+(z5cf.^2)+z4cf.*z5cf).*(A2cf/3)+((z6cf.^2)+(z7cf.^2)+z6cf.*z7cf).*(A3cf/3)+((z8cf.^2)+(z9cf.^2)+z8cf.*z9cf).*(A4cf/3)+((z10cf.^2)+(z11cf.^2)+z10cf.*z11cf).*(A5cf/3)+((z12cf.^2)+(z13cf.^2)+z12cf.*z13cf).*(A6cf/3)+((z14cf.^2)+(z15cf.^2)+z14cf.*z15cf).*(A7cf/3);
Iz0cf=((y0cf.^2)+(y1cf.^2)+y0cf.*y1cf).*(A0cf/3)+((y2cf.^2)+(y3cf.^2)+y2cf.*y3cf).*(A1cf/3)+((y4cf.^2)+(y5cf.^2)+y4cf.*y5cf).*(A2cf/3)+((y6cf.^2)+(y7cf.^2)+y6cf.*y7cf).*(A3cf/3)+((y8cf.^2)+(y9cf.^2)+y8cf.*y9cf).*(A4cf/3)+((y10cf.^2)+(y11cf.^2)+y10cf.*y11cf).*(A5cf/3)+((y12cf.^2)+(y13cf.^2)+y12cf.*y13cf).*(A6cf/3)+((y14cf.^2)+(y15cf.^2)+y14cf.*y15cf).*(A7cf/3);
Areacf=A0cf+A1cf+A2cf+A3cf+A4cf+A5cf+A6cf+A7cf;
zcgcf=Sy0cf./(A0cf+A1cf+A2cf+A3cf+A4cf+A5cf+A6cf+A7cf);
ycgcf=Sz0cf./(A0cf+A1cf+A2cf+A3cf+A4cf+A5cf+A6cf+A7cf);
Iycf=Iy0cf-(A0cf+A1cf+A2cf+A3cf+A4cf+A5cf+A6cf+A7cf).*(zcgcf.^2);
Izcf=Iz0cf-(A0cf+A1cf+A2cf+A3cf+A4cf+A5cf+A6cf+A7cf).*(ycgcf.^2);

```

%%Secção sujeita ao momento em torno de y

```

%%Classificação das secções
%%visto que a secção é simétrica em relação ao eixo y, é indiferente
%%o sinal do momento
Almafy = hp;
if hp./t < 83*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento em torno de y - Classe 2')
elseif hp./t < 124*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento em torno de y - Classe 3')
else
    disp('Alma sujeita ao momento em torno de y - Classe 4')
end;

Banzofy = bp;
if bp./t < 38*epsilon
    disp('Banzo sujeito ao momento em torno de y - Classe 2')
elseif bp./t < 42*epsilon
    disp('Banzo sujeito ao momento em torno de y - Classe 3')
else
    disp('Banzo sujeito ao momento em torno de y - Classe 4')
end;

ten1fy=(zcg-gr)./(zcg+t/2);
ten2fy=(zcg-gr-cp)./(zcg+t/2);
psifleyref=ten1fy./ten2fy;
ksigmafleyref=ksigmacompref;
Reforcofy = cp;
if cp./t < 10*epsilon
    disp('Reforço sujeito ao momento em torno de y - Classe 2')
elseif cp./t < 21*epsilon*(ksigmafleyref).^0.5
    disp('Reforço sujeito ao momento em torno de y - Classe 3')
else
    disp('Reforço sujeito ao momento em torno de y - Classe 4')
end;

%%Secções efectivas
%%Alma
psifleyalma=-1;
ksigmafleyalma=7.81-6.29*psifleyalma+9.78*(psifleyalma^2);
lambdapfleyalma=(hp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmafleyalma^0.5));

LAfy1=(lambdapfleyalma>0.673);
LAfy2=(lambdapfleyalma<0.673);
lambdapfleyalma1=(LAfy1.*lambdapfleyalma)+LAfy2;
rofleyalma1=((lambdapfleyalma1-
0.055*(3+psifleyalma))./(lambdapfleyalma1.^2)).*LAfy1;
lambdapfleyalma2=LAfy2.*lambdapfleyalma;
rofleyalma2=LAfy2;
rofleyalma=rofleyalma1+rofleyalma2;

hc=hp/(1-psifleyalma);
hfleyeff=rofleyalma.*hc;
hfleyi=hc-hfleyeff;

%%Banzo
psifleyban=1;
ksigmafleyban=8.2/(1.05+psifleyban);
lambdapfleyban=(bp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmafleyban^0.5));

LBfy1=(lambdapfleyban>0.673);
LBfy2=(lambdapfleyban<0.673);

```

```

lambdapfleyban1=(LBfy1.*lambdapfleyban)+LBfy2;
rofleyban11=((lambdapfleyban1-
0.055*(3+psifleyban))./(lambdapfleyban1.^2)).*LBfy1;
lambdapfleyban2=LBfy2.*lambdapfleyban;
rofleyban12=LBfy2;
rofleyban=rofleyban11+rofleyban12;

bfleyeff=rofleyban.*bp;

%%Reforço
lambdapfleyref=(cp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmafleyref.^0.5));

LRfy1=(lambdapfleyref>0.748);
LRfy2=(lambdapfleyref<0.748);
lambdapfleyref1=(LRfy1.*lambdapfleyref)+LRfy2;
rofleyref11=((lambdapfleyref1-0.188)./(lambdapfleyref1.^2)).*LRfy1;
lambdapfleyref2=LRfy2.*lambdapfleyref;
rofleyref12=LRfy2;
rofleyref=rofleyref11+rofleyref12;

cfleyeff=rofleyref.*cp;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
%1ª Iteração
z1fy1=gr;
z2fy1=gr+cfleyeff;
z3fy1=0;
z4fy1=0;
y1fy1=2*gr+bp;
y2fy1=y1fy1;
y3fy1=y2fy1-gr;
y4fy1=y3fy1-beff/2;
A0fy1=cfleyeff.*t;
A1fy1=(bfleyeff/2).*t;
Sy0fy1=((z1fy1+z2fy1).*(A0fy1/2)+(z3fy1+z4fy1).*(A1fy1/2));
Sz0fy1=((y1fy1+y2fy1).*(A0fy1/2)+(y3fy1+y4fy1).*(A1fy1/2));
Iy0fy1=((z1fy1.^2)+(z2fy1.^2)+z1fy1.*z2fy1).*(A0fy1/3)+((z3fy1.^2)+(z4fy1.^2)+z3fy1.*z4fy1).*(A1fy1/3);
Iz0fy1=((y1fy1.^2)+(y2fy1.^2)+y1fy1.*y2fy1).*(A0fy1/3)+((y3fy1.^2)+(y4fy1.^2)+y3fy1.*y4fy1).*(A1fy1/3);
zcgfy1=Sy0fy1./(A0fy1+A1fy1);
ycgfy1=Sz0fy1./(A0fy1+A1fy1);
Iyfy1=Iy0fy1-(A0fy1+A1fy1).*(zcgfy1.^2);
Izfy1=Iz0fy1-(A0fy1+A1fy1).*(ycgfy1.^2);
Kfy1=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-
0.3^2)).*(1./((ycgfy1.^2).*hp+(ycgfy1.^3)+0.5*ycgfy1.*ycgfy1.*hp.*1))
;
tensaocrstfy1=2*(((210*(10^3)).*Kfy1.*Iyfy1).^0.5)./(A0fy1+A1fy1);
esbeltezaadfy1=(fy./tensaocrstfy1).^0.5;

Lesbfylit1=(esbeltezaadfy1<0.65);
Lesbfylit2=(esbeltezaadfy1>1.38);
Lesbfylit3=(esbeltezaadfy1<1.38);
coefredfy11=Lesbfylit1.*1;
coefredfy12=(0.66./((esbeltezaadfy1.*Lesbfylit2)+Lesbfylit1+Lesbfylit3)
).*Lesbfylit2;
coefredfy13=(1.47-0.723*(esbeltezaadfy1.*(Lesbfylit3-
Lesbfylit1))).*(Lesbfylit3-Lesbfylit1);
coefredfy1=coefredfy11+coefredfy12+coefredfy13;

```

```

tensaocompEdfy1=coefredfy1*fy;
tredfy1=coefredfy1.*t;

%%2ª Iteração
%%Banzo
lambdapfleybanred2=lambdapfleyban.*((tensaocompEdfy1/fy).^0.5);
rofleyban21=((1-
0.055*(3+psifleyban)./lambdapfleybanred2)./(lambdapfleybanred2)+0.18*(
(lambdapfleyban1-lambdapfleybanred2)./(lambdapfleyban1-0.6))).*LBfy1;
rofleyban22=LBfy2;
rofleyban2=rofleyban21+rofleyban22;

LBfy2it1=(rofleyban2 <= 1);
bp1fleyban21=(rofleyban2.*LBfy2it1).*bp*0.5;
LBfy2it2=(rofleyban2 > 1);
bp1fleyban22=(bp.*LBfy2it2)*0.5;
bp1fleyban2=bp1fleyban21+bp1fleyban22;

bp2fleyban2= 0.5*beff;
bpifleyban2=bp-bp1fleyban2-bp2fleyban2;

%%Reforço
lambdapfleyrefred2=lambdapfleyref.*((tensaocompEdfy1/fy).^0.5);
rofleyref21=((1-
0.188./lambdapfleyrefred2)./(lambdapfleyrefred2)+0.18*(lambdapfleyref
1-lambdapfleyrefred2)./(lambdapfleyref1-0.6))).*LRfy1;
rofleyref22=LRfy2;
rofleyref2=rofleyref21+rofleyref22;

LRfy2it1=(rofleyref2 <= 1);
cp1fleyref21=(rofleyref2.*LRfy2it1).*cp;
LRfy2it2=(rofleyref2 > 1);
cp1fleyref22=(cp.*LRfy2it2);
cp1fleyref2=cp1fleyref21+cp1fleyref22;

cpifleyref2=cp-cp1fleyref2;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
z1fy2=gr;
z2fy2=gr+cp1fleyref2;
z3fy2=0;
z4fy2=0;
y1fy2=2*gr+bp;
y2fy2=y1fy2;
y3fy2=y2fy2-gr;
y4fy2=y3fy2-bp1fleyban2;
A0fy2=cp1fleyref2.*t;
A1fy2=(bp1fleyban2).*t;
Sy0fy2=((z1fy2+z2fy2).*(A0fy2/2)+(z3fy2+z4fy2).*(A1fy2/2));
Sz0fy2=((y1fy2+y2fy2).*(A0fy2/2)+(y3fy2+y4fy2).*(A1fy2/2));
Iy0fy2=((z1fy2.^2)+(z2fy2.^2)+z1fy2.*z2fy2).*(A0fy2/3)+((z3fy2.^2)+(z4
fy2.^2)+z3fy2.*z4fy2).*(A1fy2/3);
Iz0fy2=((y1fy2.^2)+(y2fy2.^2)+y1fy2.*y2fy2).*(A0fy2/3)+((y3fy2.^2)+(y4
fy2.^2)+y3fy2.*y4fy2).*(A1fy2/3);
zcgfy2=Sy0fy2./(A0fy2+A1fy2);
ycgfy2=Sz0fy2./(A0fy2+A1fy2);
Iyfy2=Iy0fy2-(A0fy2+A1fy2).*(zcgfy2.^2);
Izfy2=Iz0fy2-(A0fy2+A1fy2).*(ycgfy2.^2);

```



```

Kfy2=(( (210*(10^3)) * (t.^3)) ./ (4*(1-
0.3^2))) .* (1./ ((ycgfy2.^2) .*hp+(ycgfy2.^3)+0.5*ycgfy2.*ycgfy2.*hp.*1) )
;
tensaocrstfy2=2*(( (210*(10^3)) *Kfy2.*Iyfy2).^0.5) ./ (A0fy2+A1fy2);
esbelteza2fy2=(fy./tensaocrstfy2).^0.5;

Lesbfy2it1=(esbelteza2fy2<0.65);
Lesbfy2it2=(esbelteza2fy2>1.38);
Lesbfy2it3=(esbelteza2fy2<1.38);
coefredfy21=Lesbfy2it1.*1;
coefredfy22=(0.66./((esbelteza2fy2.*Lesbfy2it2)+Lesbfy2it1+Lesbfy2it3)
).*Lesbfy2it2;
coefredfy23=(1.47-0.723*(esbelteza2fy2.*(Lesbfy2it3-
Lesbfy2it1))).*(Lesbfy2it3-Lesbfy2it1);
coefredfy2=coefredfy21+coefredfy22+coefredfy23;

variacaocoefredfy2=coefredfy2-coefredfy1;
Qcoefredfy2=coefredfy2./coefredfy1;
tensaocompEdfy2=coefredfy2*fy;
tredfy2=coefredfy2.*t;

%%3ª Iteração
%%Banzo
lambdapfleybanred3=lambdapfleyban.*((tensaocompEdfy2/fy).^0.5);
rofleyban31=((1-
0.055*(3+psifleyban)./(lambdapfleybanred3)./(lambdapfleybanred3)+0.18*(
(lambdapfleyban1-lambdapfleybanred3)./(lambdapfleyban1-0.6))).*LBfy1;
rofleyban32=LBfy2;
rofleyban3=rofleyban31+rofleyban32;

LBfy3it1=(rofleyban3 <= 1);
bp1fleyban31=(rofleyban3.*LBfy3it1).*bp*0.5;
LBfy3it2=(rofleyban3 > 1);
bp1fleyban32=(bp.*LBfy3it2)*0.5;
bp1fleyban3=bp1fleyban31+bp1fleyban32;

bp2fleyban3= 0.5*beff;
bpifleyban3=bp-bp1fleyban3-bp2fleyban3;

%%Reforço
lambdapfleyrefred3=lambdapfleyref.*((tensaocompEdfy2/fy).^0.5);
rofleyref31=((1-
0.188./lambdapfleyrefred3)./(lambdapfleyrefred3)+0.18*( (lambdapfleyref
1-lambdapfleyrefred3)./(lambdapfleyref1-0.6))).*LRfy1;
rofleyref32=LRfy2;
rofleyref3=rofleyref31+rofleyref32;

LRfy3it1=(rofleyref3 <= 1);
cp1fleyref31=(rofleyref3.*LRfy3it1).*cp;
LRfy3it2=(rofleyref3 > 1);
cp1fleyref32=(cp.*LRfy3it2);
cp1fleyref3=cp1fleyref31+cp1fleyref32;

cpifleyref3=cp-cp1fleyref3;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
z1fy3=gr;
z2fy3=gr+cp1fleyref3;
z3fy3=0;
z4fy3=0;

```

```

y1fy3=2*gr+bp;
y2fy3=y1fy3;
y3fy3=y2fy3-gr;
y4fy3=y3fy3-bp1fleyban3;
A0fy3=cplfleyref3.*t;
A1fy3=(bp1fleyban3).*t;
Sy0fy3=((z1fy3+z2fy3).*(A0fy3/2)+(z3fy3+z4fy3).*(A1fy3/2));
Sz0fy3=((y1fy3+y2fy3).*(A0fy3/2)+(y3fy3+y4fy3).*(A1fy3/2));
Iy0fy3=((z1fy3.^2)+(z2fy3.^2)+z1fy3.*z2fy3).*(A0fy3/3)+((z3fy3.^2)+(z4fy3.^2)+z3fy3.*z4fy3).*(A1fy3/3);
Iz0fy3=((y1fy3.^2)+(y2fy3.^2)+y1fy3.*y2fy3).*(A0fy3/3)+((y3fy3.^2)+(y4fy3.^2)+y3fy3.*y4fy3).*(A1fy3/3);
zcgfy3=Sy0fy3./(A0fy3+A1fy3);
ycgfy3=Sz0fy3./(A0fy3+A1fy3);
Iyfy3=Iy0fy3-(A0fy3+A1fy3).*(zcgfy3.^2);
Izfy3=Iz0fy3-(A0fy3+A1fy3).*(ycgfy3.^2);
Kfy3=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-0.3^2))).*(1./((ycgfy3.^2).*hp+(ycgfy3.^3)+0.5*ycgfy3.*ycgfy3.*hp.*1));
;
tensaocrstfy3=2*((210*(10^3)).*Kfy3.*Iyfy3).^0.5)./(A0fy3+A1fy3);
esbeltezfady3=(fy./tensaocrstfy3).^0.5;

Lesbfy3it1=(esbeltezfady3<0.65);
Lesbfy3it2=(esbeltezfady3>1.38);
Lesbfy3it3=(esbeltezfady3<1.38);
coefredfy31=Lesbfy3it1.*1;
coefredfy32=(0.66./((esbeltezfady3.*Lesbfy3it2)+Lesbfy3it1+Lesbfy3it3)).*Lesbfy3it2;
coefredfy33=(1.47-0.723*(esbeltezfady3.*(Lesbfy3it3-Lesbfy3it1))).*(Lesbfy3it3-Lesbfy3it1);
coefredfy3=coefredfy31+coefredfy32+coefredfy33;

variacaocoefredfy3=coefredfy3-coefredfy2;
Qcoefredfy3=coefredfy3./coefredfy2;
tensaocompEdfy3=coefredfy3*fy;
tredfy3=coefredfy3.*t;

%%4ª Iteração
%%Banzo
lambdapfleybanred4=lambdapfleyban.*((tensaocompEdfy3/fy).^0.5);
rofleyban41=((1-0.055*(3+psifleyban)./lambdapfleybanred4)./(lambdapfleybanred4)+0.18*(lambdapfleyban1-lambdapfleybanred4)./(lambdapfleyban1-0.6))).*LBfy1;
rofleyban42=LBfy2;
rofleyban4=rofleyban41+rofleyban42;

LBfy4it1=(rofleyban4 <= 1);
bp1fleyban41=(rofleyban4.*LBfy4it1).*bp*0.5;
LBfy4it2=(rofleyban4 > 1);
bp1fleyban42=(bp.*LBfy4it2)*0.5;
bp1fleyban4=bp1fleyban41+bp1fleyban42;

bp2fleyban4= 0.5*beff;
bpifleyban4=bp-bp1fleyban4-bp2fleyban4;

%%Reforço
lambdapfleyrefred4=lambdapfleyref.*((tensaocompEdfy3/fy).^0.5);
rofleyref41=((1-0.188./lambdapfleyrefred4)./(lambdapfleyrefred4)+0.18*(lambdapfleyref1-lambdapfleyrefred4)./(lambdapfleyref1-0.6))).*LRfy1;

```

```

rofleyref42=LRFy2;
rofleyref4=rofleyref41+rofleyref42;

LRFy4it1=(rofleyref4 <= 1);
cplfleyref41=(rofleyref4.*LRFy4it1).*cp;
LRFy4it2=(rofleyref4 > 1);
cplfleyref42=(cp.*LRFy4it2);
cplfleyref4=cplfleyref41+cplfleyref42;

cpifleyref4=cp-cplfleyref4;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
z1fy4=gr;
z2fy4=gr+cplfleyref4;
z3fy4=0;
z4fy4=0;
y1fy4=2*gr+bp;
y2fy4=y1fy4;
y3fy4=y2fy4-gr;
y4fy4=y3fy4-bp1fleyban4;
A0fy4=cplfleyref4.*t;
A1fy4=(bp1fleyban4).*t;
Sy0fy4=((z1fy4+z2fy4).*(A0fy4/2)+(z3fy4+z4fy4).*(A1fy4/2));
Sz0fy4=((y1fy4+y2fy4).*(A0fy4/2)+(y3fy4+y4fy4).*(A1fy4/2));
Iy0fy4=((z1fy4.^2)+(z2fy4.^2)+z1fy4.*z2fy4).*(A0fy4/3)+((z3fy4.^2)+(z4fy4.^2)+z3fy4.*z4fy4).*(A1fy4/3);
Iz0fy4=((y1fy4.^2)+(y2fy4.^2)+y1fy4.*y2fy4).*(A0fy4/3)+((y3fy4.^2)+(y4fy4.^2)+y3fy4.*y4fy4).*(A1fy4/3);
zcgfy4=Sy0fy4./(A0fy4+A1fy4);
ycgfy4=Sz0fy4./(A0fy4+A1fy4);
Iyfy4=Iy0fy4-(A0fy4+A1fy4).*(zcgfy4.^2);
Izfy4=Iz0fy4-(A0fy4+A1fy4).*(ycgfy4.^2);
Kfy4=((210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-0.3^2))).*(1./((ycgfy4.^2).*hp+(ycgfy4.^3)+0.5*ycgfy4.*ycgfy4.*hp.*1));
;
tensaocrstfy4=2*((210*(10^3)).*Kfy3.*Iyfy4).^0.5)./(A0fy4+A1fy4);
esbelteza4fy4=(fy./tensaocrstfy4).^0.5;

Lesbfy4it1=(esbelteza4fy4<0.65);
Lesbfy4it2=(esbelteza4fy4>1.38);
Lesbfy4it3=(esbelteza4fy4<1.38);
coefredfy41=Lesbfy4it1.*1;
coefredfy42=(0.66./((esbelteza4fy4.*Lesbfy4it2)+Lesbfy4it1+Lesbfy4it3)).*Lesbfy4it2;
coefredfy43=(1.47-0.723*(esbelteza4fy4.*(Lesbfy4it3-Lesbfy4it1))).*(Lesbfy4it3-Lesbfy4it1);
coefredfy4=coefredfy41+coefredfy42+coefredfy43;

variacaocoefredfy4=coefredfy4-coefredfy3;
Qcoefredfy4=coefredfy4./coefredfy3;
tensaocompEdfy4=coefredfy4*fy;
tredfy4=coefredfy4.*t;

%%Cálculo das características finais da secção efectiva
z0fyf=gr+cplfleyref4;
z1fyf=gr;
z2fyf=0;
z3fyf=0;
z4fyf=0;
z5fyf=0;

```

```

z6fyf=gr;
z7fyf=z6fyf+hfleyeff/2;
z8fyf=z7fyf+hfleyi;
z9fyf=z8fyf+hfleyeff/2;
z10fyf=z9fyf;
z11fyf=z10fyf+hp/2;
z12fyf=hp+2*gr;
z13fyf=hp+2*gr;
z14fyf=hp+gr;
z15fyf=z14fyf-cp;
y0fyf=2*gr+bp;
y1fyf=2*gr+bp;
y2fyf=gr+bp;
y3fyf=y2fyf-bp1fleyban4;
y4fyf=y3fyf-bp1fleyban4;
y5fyf=y4fyf-bp2fleyban4;
y6fyf=0;
y7fyf=0;
y8fyf=0;
y9fyf=0;
y10fyf=0;
y11fyf=0;
y12fyf=gr;
y13fyf=gr+bp;
y14fyf=2*gr+bp;
y15fyf=2*gr+bp;
A0fyf=(z0fyf-z1fyf).*tredfy4;
A1fyf=(y2fyf-y3fyf).*tredfy4;
A2fyf=(y4fyf-y5fyf).*t;
A3fyf=(z7fyf-z6fyf).*t;
A4fyf=(z9fyf-z8fyf).*t;
A5fyf=(z11fyf-z10fyf).*t;
A6fyf=(y13fyf-y12fyf).*t;
A7fyf=(z14fyf-z15fyf).*t;
Sy0fyf=((z0fyf+z1fyf).*(A0fyf/2)+(z2fyf+z3fyf).*(A1fyf/2)+(z4fyf+z5fyf).*(A2fyf/2)+(z6fyf+z7fyf).*(A3fyf/2)+(z8fyf+z9fyf).*(A4fyf/2)+(z10fyf+z11fyf).*(A5fyf/2)+(z12fyf+z13fyf).*(A6fyf/2)+(z14fyf+z15fyf).*(A7fyf/2));
Sz0fyf=((y0fyf+y1fyf).*(A0fyf/2)+(y2fyf+y3fyf).*(A1fyf/2)+(y4fyf+y5fyf).*(A2fyf/2)+(y6fyf+y7fyf).*(A3fyf/2)+(y8fyf+y9fyf).*(A4fyf/2)+(y10fyf+y11fyf).*(A5fyf/2)+(y12fyf+y13fyf).*(A6fyf/2)+(y14fyf+y15fyf).*(A7fyf/2));
Iy0fyf=((z0fyf.^2)+(z1fyf.^2)+z0fyf.*z1fyf).*(A0fyf/3)+((z2fyf.^2)+(z3fyf.^2)+z2fyf.*z3fyf).*(A1fyf/3)+((z4fyf.^2)+(z5fyf.^2)+z4fyf.*z5fyf).*(A2fyf/3)+((z6fyf.^2)+(z7fyf.^2)+z6fyf.*z7fyf).*(A3fyf/3)+((z8fyf.^2)+(z9fyf.^2)+(z8fyf.*z9fyf).*(A4fyf/3)+((z10fyf.^2)+(z11fyf.^2)+z10fyf.*z11fyf).*(A5fyf/3)+((z12fyf.^2)+(z13fyf.^2)+z12fyf.*z13fyf).*(A6fyf/3)+((z14fyf.^2)+(z15fyf.^2)+z14fyf.*z15fyf).*(A7fyf/3);
Iz0fyf=((y0fyf.^2)+(y1fyf.^2)+y0fyf.*y1fyf).*(A0fyf/3)+((y2fyf.^2)+(y3fyf.^2)+y2fyf.*y3fyf).*(A1fyf/3)+((y4fyf.^2)+(y5fyf.^2)+y4fyf.*y5fyf).*(A2fyf/3)+((y6fyf.^2)+(y7fyf.^2)+y6fyf.*y7fyf).*(A3fyf/3)+((y8fyf.^2)+(y9fyf.^2)+(y8fyf.*y9fyf).*(A4fyf/3)+((y10fyf.^2)+(y11fyf.^2)+y10fyf.*y11fyf).*(A5fyf/3)+((y12fyf.^2)+(y13fyf.^2)+y12fyf.*y13fyf).*(A6fyf/3)+((y14fyf.^2)+(y15fyf.^2)+y14fyf.*y15fyf).*(A7fyf/3);
Iyz0fyf=((2*y0fyf.*z0fyf+2*y1fyf.*z1fyf+y0fyf.*z1fyf+y1fyf.*z0fyf).*(A0fyf/6)+(2*y2fyf.*z2fyf+2*y3fyf.*z3fyf+y2fyf.*z3fyf+y3fyf.*z2fyf).*(A1fyf/6)+(2*y4fyf.*z4fyf+2*y5fyf.*z5fyf+y4fyf.*z5fyf+y5fyf.*z4fyf).*(A2fyf/6)+(2*y6fyf.*z6fyf+2*y7fyf.*z7fyf+y6fyf.*z7fyf+y7fyf.*z6fyf).*(A3fyf/6)+(2*y8fyf.*z8fyf+2*y9fyf.*z9fyf+y8fyf.*z9fyf+y9fyf.*z8fyf).*(A4fyf/6)+(2*y10fyf.*z10fyf+2*y11fyf.*z11fyf+y10fyf.*z11fyf+y11fyf.*z10fyf).*(A5fyf/6)+(2*y12fyf.*z12fyf+2*y13fyf.*z13fyf+y12fyf.*z13fyf+y13fyf.*z

```

```

12fyf) .*(A6fyf/6)+(2*y14fyf.*z14fyf+2*y15fyf.*z15fyf+y14fyf.*z15fyf+y1
5fyf.*z14fyf) .*(A7fyf/6));
Itfy=(( (A0fyf+A1fyf) .*(tredfy4.^2))+( (A2fyf+A3fyf+A4fyf+A5fyf+A6fyf+A7
fyf) .*t))/3;
w01fy=-(y0fyf.*z1fyf-y1fyf.*z0fyf);
w02fy=-(y2fyf.*z3fyf-y3fyf.*z2fyf);
w03fy=-(y4fyf.*z5fyf-y5fyf.*z4fyf);
w04fy=-(y6fyf.*z7fyf-y7fyf.*z6fyf);
w05fy=-(y8fyf.*z9fyf-y9fyf.*z8fyf);
w06fy=-(y10fyf.*z11fyf-y11fyf.*z10fyf);
w07fy=-(y12fyf.*z13fyf-y13fyf.*z12fyf);
w08fy=-(y14fyf.*z15fyf-y15fyf.*z14fyf);
w0fy=0;
w2fy=w01fy+w0fy;
w4fy=w02fy+w2fy;
w6fy=w03fy+w4fy;
w8fy=w04fy+w6fy;
w10fy=w05fy+w8fy;
w12fy=w06fy+w10fy;
w14fy=w07fy+w12fy;
w1fy=w01fy+w0fy;
w3fy=w02fy+w2fy;
w5fy=w03fy+w4fy;
w7fy=w04fy+w6fy;
w9fy=w05fy+w8fy;
w11fy=w06fy+w10fy;
w13fy=w07fy+w12fy;
w15fy=w08fy+w14fy;
Iyw0fy=((2*y0fyf.*w0fy+2*y1fyf.*w1fy+y0fyf.*w1fy+y1fyf.*w0fy) .*(A0fyf/
6)+(2*y2fyf.*w2fy+2*y3fyf.*w3fy+y2fyf.*w3fy+y3fyf.*w2fy) .*(A1fyf/6)+(2
*y4fyf.*w4fy+2*y5fyf.*w5fy+y4fyf.*w5fy+y5fyf.*w4fy) .*(A2fyf/6)+(2*y6fy
f.*w6fy+2*y7fyf.*w7fy+y6fyf.*w7fy+y7fyf.*w6fy) .*(A3fyf/6)+(2*y8fyf.*w8
fy+2*y9fyf.*w9fy+y8fyf.*w9fy+y9fyf.*w8fy) .*(A4fyf/6)+(2*y10fyf.*w10fy+
2*y11fyf.*w11fy+y10fyf.*w11fy+y11fyf.*w10fy) .*(A5fyf/6)+(2*y12fyf.*w12
fy+2*y13fyf.*w13fy+y12fyf.*w13fy+y13fyf.*w12fy) .*(A6fyf/6)+(2*y14fyf.*
w14fy+2*y15fyf.*w15fy+y14fyf.*w15fy+y15fyf.*w14fy) .*(A7fyf/6));
Izw0fy=((2*z0fyf.*w0fy+2*z1fyf.*w1fy+z0fyf.*w1fy+z1fyf.*w0fy) .*(A0fyf/
6)+(2*z2fyf.*w2fy+2*z3fyf.*w3fy+z2fyf.*w3fy+z3fyf.*w2fy) .*(A1fyf/6)+(2
*z4fyf.*w4fy+2*z5fyf.*w5fy+z4fyf.*w5fy+z5fyf.*w4fy) .*(A2fyf/6)+(2*z6fy
f.*w6fy+2*z7fyf.*w7fy+z6fyf.*w7fy+z7fyf.*w6fy) .*(A3fyf/6)+(2*z8fyf.*w8
fy+2*z9fyf.*w9fy+z8fyf.*w9fy+z9fyf.*w8fy) .*(A4fyf/6)+(2*z10fyf.*w10fy+
2*z11fyf.*w11fy+z10fyf.*w11fy+z11fyf.*w10fy) .*(A5fyf/6)+(2*z12fyf.*w12
fy+2*z13fyf.*w13fy+z12fyf.*w13fy+z13fyf.*w12fy) .*(A6fyf/6)+(2*z14fyf.*
w14fy+2*z15fyf.*w15fy+z14fyf.*w15fy+z15fyf.*w14fy) .*(A7fyf/6));
Iww0fy=(( (w0fy.^2)+(w1fy.^2)+w0fy.*w1fy) .*(A0fyf/3)+((w2fy.^2)+(w3fy.^
2)+w2fy.*w3fy) .*(A1fyf/3)+((w4fy.^2)+(w5fy.^2)+w4fy.*w5fy) .*(A2fyf/3)+
((w6fy.^2)+(w7fy.^2)+w6fy.*w7fy) .*(A3fyf/3)+((w8fy.^2)+(w9fy.^2)+w8fy.
*w9fy) .*(A4fyf/3)+((w10fy.^2)+(w11fy.^2)+w10fy.*w11fy) .*(A5fyf/3)+((w1
2fy.^2)+(w13fy.^2)+w12fy.*w13fy) .*(A6fyf/3)+((w14fy.^2)+(w15fy.^2)+w14
fy.*w15fy) .*(A7fyf/3));
IWfy=((w0fy+w1fy) .*(A0fyf/2)+(w2fy+w3fy) .*(A1fyf/2)+(w4fy+w5fy) .*(A2fy
f/2)+(w6fy+w7fy) .*(A3fyf/2)+(w8fy+w9fy) .*(A4fyf/2)+(w10fy+w11fy) .*(A5f
yf/2)+(w12fy+w13fy) .*(A6fyf/2)+(w14fy+w15fy) .*(A7fyf/2));
Arefy=A0fyf+A1fyf+A2fyf+A3fyf+A4fyf+A5fyf+A6fyf+A7fyf;
zcgfy=Sy0fyf./Arefy;
ycgfy=Sz0fyf./Arefy;
Iyfy=Iy0fyf-Arefy.*(zcgfy.^2);
Izfy=Iz0fyf-Arefy.*(ycgfy.^2);
Iyzfy=Iyz0fyf-(Sy0fyf.*Sz0fyf)./Arefy;
Iywfy=Iyw0fy-(IWfy.*Sz0fyf)./Arefy;
Izwfy=Izw0fy-(IWfy.*Sy0fyf)./Arefy;

```

```

Iwwfy=Iww0fy-(IWfy.^2)./Areafy;
yscfy=-(Izwfy.*Izfy-Iywyf.*Iyzfy)/(Iyfy.*Izfy-Iyzfy.^2);
zscfy=(Iwyfy.*Iyfy-Izwfy.*Iyzfy)/(Iyfy.*Izfy-Iyzfy.^2);
Iwyfy=Iwwfy+zscfy.*Iwyfy-yscfy.*Izwfy;
ysfy=yscfy-ycgfy;
zsfy=zscfy-zcgfy;

%%Secção sujeita ao momento em torno de z
%%Momento positivo
%%Classificação das secções

Almaflzpos = hp;
if hp./t < 38*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento positivo em torno de z - Classe 2')
elseif hp./t < 42*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento positivo em torno de z - Classe 3')
else
    disp('Alma sujeita ao momento positivo em torno de z - Classe 4')
end;

%%Para o banzo, primeiro tem que se definir qual a tensão nas
extremidades
%%do mesmo
ten1zpos=-(ycg-gr)/(b-t/2-gr-ycg);
ten2zpos=(bp+gr-ycg)/(b-t/2-gr-ycg);
psiflezposban=ten1zpos/ten2zpos;
Banzoflzpos = bp;
if bp./t < (42*epsilon)/(0.67+0.33*psiflezposban)
    disp('Banzo sujeito ao momento positivo em torno de z - Pelo
menos Classe 3')
else
    disp('Banzo sujeito ao momento positivo em torno de z - Classe
4')
end;

ksigmaflezref=ksigmafleyref;
Reforcoflzpos = cp;
if cp./t < 10*epsilon
    disp('Reforço sujeito ao momento positivo em torno de z - Classe
2')
elseif cp./t < 14*epsilon
    disp('Reforço sujeito ao momento positivo em torno de z - Classe
3')
else
    disp('Reforço sujeito ao momento positivo em torno de z - Classe
4')
end;

%%Secções efectivas
%%Alma - por estar a tracção toda ela é efectiva
hfleziposeff=hp;

%%Banzo
ksigmafleziposban=7.81-6.29*psifleziposban+9.78*(psifleziposban.^2);
lambdapfleziposban=(bp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmafleziposban.^0.5));

LBfz1=(lambdapfleziposban>0.673);
LBfz2=(lambdapfleziposban<0.673);
lambdapfleziposban1=(LBfz1.*lambdapfleziposban)+LBfz2;

```

```

roflezposban11=((lambdapflezposban1-
0.055*(3+psiflezposban))./(lambdapflezposban1.^2)).*LBfzp1;
lambdapflezposban2=LBfzp2.*lambdapflezposban;
roflezposban12=LBfzp2;
roflezposban=roflezposban11+roflezposban12;

bc=bp./(1-psiflezposban);
bflezposeff=roflezposban.*bc;
bflezposi=bc-bflezposeff;

%%Reforço
lambdapflezposref=(cp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmaflezeff.^0.5));

LRfzp1=(lambdapflezposref>0.748);
LRfzp2=(lambdapflezposref<0.748);
lambdapflezposref1=(LRfzp1.*lambdapflezposref)+LRfzp2;
roflezposref11=((lambdapflezposref1-
0.188)./(lambdapflezposref1.^2)).*LRfzp1;
lambdapflezposref2=LRfzp2.*lambdapflezposref;
roflezposref12=LRfzp2;
roflezposref=roflezposref11+roflezposref12;

cflezposeff=roflezposref.*cp;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
%%1ª Iteração
z1fzp1=gr;
z2fzp1=gr+cflezposeff;
z3fzp1=0;
z4fzp1=0;
y1fzp1=2*gr+bp;
y2fzp1=y1fzp1;
y3fzp1=y2fzp1-gr;
y4fzp1=y3fzp1-bflezposeff/2;
A0fzp1=cflezposeff.*t;
A1fzp1=(bflezposeff/2).*t;
Sy0fzp1=((z1fzp1+z2fzp1).*(A0fzp1/2)+(z3fzp1+z4fzp1).*(A1fzp1/2));
Sz0fzp1=((y1fzp1+y2fzp1).*(A0fzp1/2)+(y3fzp1+y4fzp1).*(A1fzp1/2));
Iy0fzp1=((z1fzp1.^2)+(z2fzp1.^2)+z1fzp1.*z2fzp1).*(A0fzp1/3)+((z3fzp1.^2)+(z4fzp1.^2)+z3fzp1.*z4fzp1).*(A1fzp1/3);
Iz0fzp1=((y1fzp1.^2)+(y2fzp1.^2)+y1fzp1.*y2fzp1).*(A0fzp1/3)+((y3fzp1.^2)+(y4fzp1.^2)+y3fzp1.*y4fzp1).*(A1fzp1/3);
zcgfzp1=Sy0fzp1./(A0fzp1+A1fzp1);
ycgfzp1=Sz0fzp1./(A0fzp1+A1fzp1);
Iyfzp1=Iy0fzp1-(A0fzp1+A1fzp1).*(zcgfzp1.^2);
Izfzp1=Iz0fzp1-(A0fzp1+A1fzp1).*(ycgfzp1.^2);
Kfzp1=((210*(10^3)).*(t.^3))/(4*(1-
0.3^2)).*(1./((ycgfzp1.^2).*hp+(ycgfzp1.^3)+0.5*ycgfzp1.*ycgfzp1.*hp.
*1));
tensaocrstfzp1=2*((210*(10^3)).*Kfzp1.*Iyfzp1).^0.5./(A0fzp1+A1fzp1);
esbeltezaadfzp1=(fy./tensaocrstfzp1).^0.5;

Lesbfzplit1=(esbeltezaadfzp1<0.65);
Lesbfzplit2=(esbeltezaadfzp1>1.38);
Lesbfzplit3=(esbeltezaadfzp1<1.38);
coefredfzp11=Lesbfzplit1.*1;
coefredfzp12=(0.66./((esbeltezaadfzp1.*Lesbfzplit2)+Lesbfzplit1+Lesbfzplit3)).*Lesbfzplit2;
coefredfzp13=(1.47-0.723*(esbeltezaadfzp1.*(Lesbfzplit3-
Lesbfzplit1))).*(Lesbfzplit3-Lesbfzplit1);

```

```

coefredfzpl=coefredfzpl1+coefredfzpl2+coefredfzpl3;

tensaocompEdfzpl=coefredfzpl*fy;
tredfzpl=coefredfzpl.*t;

%%2ª Iteração
%%Secções efectivas
%%Banzo
lambdapflezposbanred2=lambdapflezposban.*((tensaocompEdfzpl/fy).^0.5);
roflezposban21=((1-
0.055*(3+psiflezposban)./lambdapflezposbanred2)./(lambdapflezposbanred
2)+0.18*((lambdapflezposban1-
lambdapflezposbanred2)./(lambdapflezposban1-0.6))).*LBfzp1;
roflezposban22=LBfzp2;
roflezposban2=roflezposban21+roflezposban22;
bc2=bp./(1-psiflezposban);

LBfzp2it1=(roflezposban2 <= 1);
bflezposeff21=(roflezposban2.*LBfzp2it1).*bc2;
LBfzp2it2=(roflezposban2 > 1);
bflezposeff22=(bc2.*LBfzp2it2);
bflezposeff2=bflezposeff21+bflezposeff22;

bflezposi2=bc-bflezposeff2;

%%Reforço
lambdapflezposrefred2=lambdapflezposref.*((tensaocompEdfzpl/fy).^0.5);
roflezposref21=((1-
0.188./lambdapflezposrefred2)./(lambdapflezposrefred2)+0.18*((lambdapf
lezposref1-lambdapflezposrefred2)./(lambdapflezposref1-0.6))).*LRfzp1;
roflezposref22=LRfzp2;
roflezposref2=roflezposref21+roflezposref22;

LRfzp2it1=(roflezposref2 <= 1);
cp1flezposeff21=(roflezposref2.*LRfzp2it1).*cp;
LRfzp2it2=(roflezposref2 > 1);
cp1flezposeff22=(cp.*LRfzp2it2);
cp1flezposeff2=cp1flezposeff21+cp1flezposeff22;

cpiflezposeff2=cp-cp1flezposeff2;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
z1fzp2=gr;
z2fzp2=gr+cp1flezposeff2;
z3fzp2=0;
z4fzp2=0;
y1fzp2=2*gr+bp;
y2fzp2=y1fzp2;
y3fzp2=y2fzp2-gr;
y4fzp2=y3fzp2-bflezposeff2/2;
A0fzp2=cp1flezposeff2.*t;
A1fzp2=(bflezposeff2/2).*t;
Sy0fzp2=((z1fzp2+z2fzp2).*(A0fzp2/2)+(z3fzp2+z4fzp2).*(A1fzp2/2));
Sz0fzp2=((y1fzp2+y2fzp2).*(A0fzp2/2)+(y3fzp2+y4fzp2).*(A1fzp2/2));
Iy0fzp2=((z1fzp2.^2)+(z2fzp2.^2)+z1fzp2.*z2fzp2).*(A0fzp2/3)+((z3fzp2.
^2)+(z4fzp2.^2)+z3fzp2.*z4fzp2).*(A1fzp2/3);
Iz0fzp2=((y1fzp2.^2)+(y2fzp2.^2)+y1fzp2.*y2fzp2).*(A0fzp2/3)+((y3fzp2.
^2)+(y4fzp2.^2)+y3fzp2.*y4fzp2).*(A1fzp2/3);
zcgfzp2=Sy0fzp2./(A0fzp2+A1fzp2);
ycgfzp2=Sz0fzp2./(A0fzp2+A1fzp2);

```



```

Iyfpz2=Iy0fpz2-(A0fpz2+A1fpz2).*(zcgfp2.^2);
Izfpz2=Iz0fpz2-(A0fpz2+A1fpz2).*(ycgfp2.^2);
Kfzp2=((210*(10^3))*(t.^3))/(4*(1-
0.3^2))).*(1./((ycgfp2.^2).*hp+(ycgfp2.^3)+0.5*ycgfp2.*ycgfp2.*hp.
*1));
tensaocrstfzp2=2*((210*(10^3))*Kfzp2.*Iyfpz2).^0.5)./(A0fpz2+A1fpz2);
esbeltezadfzp2=(fy./tensaocrstfzp2).^0.5;

Lesbfzp2it1=(esbeltezadfzp2<0.65);
Lesbfzp2it2=(esbeltezadfzp2>1.38);
Lesbfzp2it3=(esbeltezadfzp2<1.38);
coefredfzp21=Lesbfzp2it1.*1;
coefredfzp22=(0.66./((esbeltezadfzp2.*Lesbfzp2it2)+Lesbfzp2it1+Lesbfzp
2it3)).*Lesbfzp2it2;
coefredfzp23=(1.47-0.723*(esbeltezadfzp2.*(Lesbfzp2it3-
Lesbfzp2it1))).*(Lesbfzp2it3-Lesbfzp2it1);
coefredfzp2=coefredfzp21+coefredfzp22+coefredfzp23;

variacaocoefredfzp2=coefredfzp2-coefredfzp1;
Qcoefredfzp2=coefredfzp2./coefredfzp1;
tensaocompEdfzp2=coefredfzp2*fy;
tredfzp2=coefredfzp2.*t;

%%3ª Iteração
%%Banzo
lambdapflezposbanred3=lambdapflezposban.*((tensaocompEdfzp2/fy).^0.5);
roflezposban31=((1-
0.055*(3+psiflezposban)./(lambdapflezposbanred3)./(lambdapflezposbanred
3)+0.18*((lambdapflezposban1-
lambdapflezposbanred3)./(lambdapflezposban1-0.6))).*LBfzp1;
roflezposban32=LBfzp2;
roflezposban3=roflezposban31+roflezposban32;
bc3=bp./(1-psiflezposban);

LBfzp3it1=(roflezposban3 <= 1);
bflezposeff31=(roflezposban3.*LBfzp3it1).*bc3;
LBfzp3it2=(roflezposban3 > 1);
bflezposeff32=(bc3.*LBfzp3it2);
bflezposeff3=bflezposeff31+bflezposeff32;

bflezposi3=bc-bflezposeff3;

%%Reforço
lambdapflezposrefred3=lambdapflezposref.*((tensaocompEdfzp2/fy).^0.5);
roflezposref31=((1-
0.188./lambdapflezposrefred3)./(lambdapflezposrefred3)+0.18*((lambdapf
lezposref1-lambdapflezposrefred3)./(lambdapflezposref1-0.6))).*LRfzp1;
roflezposref32=LRfzp2;
roflezposref3=roflezposref31+roflezposref32;

LRfzp3it1=(roflezposref3 <= 1);
cp1fleziposeff31=(roflezposref3.*LRfzp3it1).*cp;
LRfzp3it2=(roflezposref3 > 1);
cp1fleziposeff32=(cp.*LRfzp3it2);
cp1fleziposeff3=cp1fleziposeff31+cp1fleziposeff32;

cpifleziposeff3=cp-cp1fleziposeff3;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
zlfzp3=gr;

```

```

z2fzp3=gr+cp1fleziposeff3;
z3fzp3=0;
z4fzp3=0;
y1fzp3=2*gr+bp;
y2fzp3=y1fzp3;
y3fzp3=y2fzp3-gr;
y4fzp3=y3fzp3-bfleziposeff3/2;
A0fzp3=cp1fleziposeff3.*t;
A1fzp3=(bfleziposeff3/2).*t;
Sy0fzp3=((z1fzp3+z2fzp3).*(A0fzp3/2)+(z3fzp3+z4fzp3).*(A1fzp3/2));
Sz0fzp3=((y1fzp3+y2fzp3).*(A0fzp3/2)+(y3fzp3+y4fzp3).*(A1fzp3/2));
Iy0fzp3=((z1fzp3.^2)+(z2fzp3.^2)+z1fzp3.*z2fzp3).*(A0fzp3/3)+((z3fzp3.^2)+(z4fzp3.^2)+z3fzp3.*z4fzp3).*(A1fzp3/3);
Iz0fzp3=((y1fzp3.^2)+(y2fzp3.^2)+y1fzp3.*y2fzp3).*(A0fzp3/3)+((y3fzp3.^2)+(y4fzp3.^2)+y3fzp3.*y4fzp3).*(A1fzp3/3);
zcgfzp3=Sy0fzp3./(A0fzp3+A1fzp3);
ycgfzp3=Sz0fzp3./(A0fzp3+A1fzp3);
Iyfzp3=Iy0fzp3-(A0fzp3+A1fzp3).*(zcgfzp3.^2);
Izfzp3=Iz0fzp3-(A0fzp3+A1fzp3).*(ycgfzp3.^2);
Kfzp3=(( (210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-0.3^2))).*(1./((ycgfzp3.^2).*hp+(ycgfzp3.^3)+0.5*ycgfzp3.*ycgfzp3.*hp.*1));
tensaocrstfzp3=2*(( (210*(10^3)).*Kfzp3.*Iyfzp3).^0.5)./(A0fzp3+A1fzp3);
esbeltezfzp3=(fy./tensaocrstfzp3).^0.5;

Lesbfzp3it1=(esbeltezfzp3<0.65);
Lesbfzp3it2=(esbeltezfzp3>1.38);
Lesbfzp3it3=(esbeltezfzp3<1.38);
coefredfzp31=Lesbfzp3it1.*1;
coefredfzp32=(0.66./((esbeltezfzp3.*Lesbfzp3it2)+Lesbfzp3it1+Lesbfzp3it3)).*Lesbfzp3it2;
coefredfzp33=(1.47-0.723*(esbeltezfzp3.*(Lesbfzp3it3-Lesbfzp3it1))).*(Lesbfzp3it3-Lesbfzp3it1);
coefredfzp3=coefredfzp31+coefredfzp32+coefredfzp33;

variacaocoefredfzp3=coefredfzp3-coefredfzp2;
Qcoefredfzp3=coefredfzp3./coefredfzp2;
tensaocompEdfzp3=coefredfzp3*fy;
tredfzp3=coefredfzp3.*t;

%%4ª Iteração
%%Banzo
lambdapfleziposbanred4=lambdapfleziposban.*((tensaocompEdfzp3/fy).^0.5);
rofleziposban41=((1-0.055*(3+psifleziposban)./lambdapfleziposbanred4)./(lambdapfleziposbanred4)+0.18*((lambdapfleziposban1-lambdapfleziposbanred4)./(lambdapfleziposban1-0.6))).*LBfzp1;
rofleziposban42=LBfzp2;
rofleziposban4=rofleziposban41+rofleziposban42;
bc4=bp./(1-psifleziposban);

LBfzp4it1=(rofleziposban4 <= 1);
bfleziposeff41=(rofleziposban4.*LBfzp4it1).*bc4;
LBfzp4it2=(rofleziposban4 > 1);
bfleziposeff42=(bc4.*LBfzp4it2);
bfleziposeff4=bfleziposeff41+bfleziposeff42;

bfleziposi4=bc-bfleziposeff4;

%%Reforço

```

```

lambdapflezposrefred4=lambdapflezposref.*( (tensaocompEdfzp3/fy).^0.5);
roflezposref41=((1-
0.188./lambdapflezposrefred4)./(lambdapflezposrefred4)+0.18*( (lambdapf
lezposref1-lambdapflezposrefred4)./(lambdapflezposref1-0.6))).*LRfzp1;
roflezposref42=LRfzp2;
roflezposref4=roflezposref41+roflezposref42;

LRfzp4it1=(roflezposref4 <= 1);
cplfleziposeff41=(roflezposref4.*LRfzp4it1).*cp;
LRfzp4it2=(roflezposref4 > 1);
cplfleziposeff42=(cp.*LRfzp4it2);
cplfleziposeff4=cplfleziposeff41+cplfleziposeff42;

cpifleziposeff4=cp-cplfleziposeff4;

%%Cálculo da espessura reduzida dos reforços
z1fzp4=gr;
z2fzp4=gr+cplfleziposeff4;
z3fzp4=0;
z4fzp4=0;
y1fzp4=2*gr+bp;
y2fzp4=y1fzp3;
y3fzp4=y2fzp3-gr;
y4fzp4=y3fzp3-bfleziposeff4/2;
A0fzp4=cplfleziposeff4.*t;
A1fzp4=(bfleziposeff4/2).*t;
Sy0fzp4=((z1fzp4+z2fzp4).*(A0fzp4/2)+(z3fzp4+z4fzp4).*(A1fzp4/2));
Sz0fzp4=((y1fzp4+y2fzp4).*(A0fzp4/2)+(y3fzp4+y4fzp4).*(A1fzp4/2));
Iy0fzp4=((z1fzp4.^2)+(z2fzp4.^2)+z1fzp4.*z2fzp4).*(A0fzp4/3)+((z3fzp4.
^2)+(z4fzp4.^2)+z3fzp4.*z4fzp4).*(A1fzp4/3);
Iz0fzp4=((y1fzp4.^2)+(y2fzp4.^2)+y1fzp4.*y2fzp4).*(A0fzp4/3)+((y3fzp4.
^2)+(y4fzp4.^2)+y3fzp4.*y4fzp4).*(A1fzp4/3);
zcgfzp4=Sy0fzp4./(A0fzp4+A1fzp4);
ycgfzp4=Sz0fzp4./(A0fzp4+A1fzp4);
Iyfzp4=Iy0fzp3-(A0fzp4+A1fzp4).*(zcgfzp4.^2);
Izfzp4=Iz0fzp3-(A0fzp4+A1fzp4).*(ycgfzp4.^2);
Kfzp4=(( (210*(10^3)).*(t.^3))./(4*(1-
0.3^2))).*(1./((ycgfzp4.^2).*hp+(ycgfzp4.^3)+0.5*ycgfzp4.*ycgfzp4.*hp.
*1));
tensaocrstfzp4=2*(( (210*(10^3)).*Kfzp4.*Iyfzp4).^0.5)./(A0fzp4+A1fzp4);
esbeltezadfzp4=(fy./tensaocrstfzp4).^0.5;

Lesbfzp4it1=(esbeltezadfzp4<0.65);
Lesbfzp4it2=(esbeltezadfzp4>1.38);
Lesbfzp4it3=(esbeltezadfzp4<1.38);
coefredfzp41=Lesbfzp4it1.*1;
coefredfzp42=(0.66./((esbeltezadfzp4.*Lesbfzp4it2)+Lesbfzp4it1+Lesbfzp
4it3)).*Lesbfzp4it2;
coefredfzp43=(1.47-0.723*(esbeltezadfzp4.*(Lesbfzp4it3-
Lesbfzp4it1))).*(Lesbfzp4it3-Lesbfzp4it1);
coefredfzp4=coefredfzp41+coefredfzp42+coefredfzp43;

variacaocoefredfzp4=coefredfzp4-coefredfzp3;
Qcoefredfzp4=coefredfzp4./coefredfzp3;
tensaocompEdfzp4=coefredfzp4*fy;
tredfzp4=coefredfzp4.*t;

%%Cálculo das características finais da secção efectiva
z0fzpf=gr+cplfleziposeff4;
z1fzpf=gr;

```

```

z2fzpf=0;
z3fzpf=0;
z4fzpf=0;
z5fzpf=0;
z6fzpf=gr;
z7fzpf=z6fzpf+hp;
z8fzpf=z7fzpf+gr;
z9fzpf=z8fzpf;
z10fzpf=z9fzpf;
z11fzpf=z10fzpf;
z12fzpf=z11fzpf-gr;
z13fzpf=z12fzpf-cp1flezposeff4;
y0fzpf=2*gr+bp;
y1fzpf=2*gr+bp;
y2fzpf=gr+bp;
y3fzpf=y2fzpf-bflezposeff4/2;
y4fzpf=y3fzpf;
y5fzpf=y4fzpf-bflezposeff4/2-ycg+gr;
y6fzpf=0;
y7fzpf=0;
y8fzpf=gr;
y9fzpf=y8fzpf+ycg-gr+bflezposeff4/2;
y10fzpf=y9fzpf;
y11fzpf=y10fzpf+bflezposeff4/2;
y12fzpf=2*gr+bp;
y13fzpf=2*gr+bp;
A0fzpf=(z0fzpf-z1fzpf).*tredfzp4;
A1fzpf=(y2fzpf-y3fzpf).*tredfzp4;
A2fzpf=(y4fzpf-y5fzpf).*t;
A3fzpf=(z7fzpf-z6fzpf).*t;
A4fzpf=(y9fzpf-y8fzpf).*t;
A5fzpf=(y11fzpf-y10fzpf).*tredfzp4;
A6fzpf=(z12fzpf-z13fzpf).*tredfzp4;
Sy0fzpf=((z0fzpf+z1fzpf).*(A0fzpf/2)+(z2fzpf+z3fzpf).*(A1fzpf/2)+(z4fzpf+z5fzpf).*(A2fzpf/2)+(z6fzpf+z7fzpf).*(A3fzpf/2)+(z8fzpf+z9fzpf).*(A4fzpf/2)+(z10fzpf+z11fzpf).*(A5fzpf/2)+(z12fzpf+z13fzpf).*(A6fzpf/2));
Sz0fzpf=((y0fzpf+y1fzpf).*(A0fzpf/2)+(y2fzpf+y3fzpf).*(A1fzpf/2)+(y4fzpf+y5fzpf).*(A2fzpf/2)+(y6fzpf+y7fzpf).*(A3fzpf/2)+(y8fzpf+y9fzpf).*(A4fzpf/2)+(y10fzpf+y11fzpf).*(A5fzpf/2)+(y12fzpf+y13fzpf).*(A6fzpf/2));
Iy0fzpf=((z0fzpf.^2)+(z1fzpf.^2)+z0fzpf.*z1fzpf).*(A0fzpf/3)+((z2fzpf.^2)+(z3fzpf.^2)+z2fzpf.*z3fzpf).*(A1fzpf/3)+((z4fzpf.^2)+(z5fzpf.^2)+z4fzpf.*z5fzpf).*(A2fzpf/3)+((z6fzpf.^2)+(z7fzpf.^2)+z6fzpf.*z7fzpf).*(A3fzpf/3)+((z8fzpf.^2)+(z9fzpf.^2)+z8fzpf.*z9fzpf).*(A4fzpf/3)+((z10fzpf.^2)+(z11fzpf.^2)+z10fzpf.*z11fzpf).*(A5fzpf/3)+((z12fzpf.^2)+(z13fzpf.^2)+z12fzpf.*z13fzpf).*(A6fzpf/3);
Iz0fzpf=((y0fzpf.^2)+(y1fzpf.^2)+y0fzpf.*y1fzpf).*(A0fzpf/3)+((y2fzpf.^2)+(y3fzpf.^2)+y2fzpf.*y3fzpf).*(A1fzpf/3)+((y4fzpf.^2)+(y5fzpf.^2)+y4fzpf.*y5fzpf).*(A2fzpf/3)+((y6fzpf.^2)+(y7fzpf.^2)+y6fzpf.*y7fzpf).*(A3fzpf/3)+((y8fzpf.^2)+(y9fzpf.^2)+y8fzpf.*y9fzpf).*(A4fzpf/3)+((y10fzpf.^2)+(y11fzpf.^2)+y10fzpf.*y11fzpf).*(A5fzpf/3)+((y12fzpf.^2)+(y13fzpf.^2)+y12fzpf.*y13fzpf).*(A6fzpf/3);
Iyz0fzpf=((2*y0fzpf.*z0fzpf+2*y1fzpf.*z1fzpf+y0fzpf.*z1fzpf+y1fzpf.*z0fzpf).*(A0fzpf/6)+(2*y2fzpf.*z2fzpf+2*y3fzpf.*z3fzpf+y2fzpf.*z3fzpf+y3fzpf.*z2fzpf).*(A1fzpf/6)+(2*y4fzpf.*z4fzpf+2*y5fzpf.*z5fzpf+y4fzpf.*z5fzpf+y5fzpf.*z4fzpf).*(A2fzpf/6)+(2*y6fzpf.*z6fzpf+2*y7fzpf.*z7fzpf+y6fzpf.*z7fzpf+y7fzpf.*z6fzpf).*(A3fzpf/6)+(2*y8fzpf.*z8fzpf+2*y9fzpf.*z9fzpf+y8fzpf.*z9fzpf+y9fzpf.*z8fzpf).*(A4fzpf/6)+(2*y10fzpf.*z10fzpf+2*y11fzpf.*z11fzpf+y10fzpf.*z11fzpf+y11fzpf.*z10fzpf).*(A5fzpf/6)+(2*y12fzpf.*z12fzpf+2*y13fzpf.*z13fzpf+y12fzpf.*z13fzpf+y13fzpf.*z12fzpf).*(A6fzpf/6));

```

```

Itfzpf=((A0fzpf.*(tredfzp4.^2))/3+(A1fzpf.*(tredfzp4.^2))/3+(A2fzpf.*(t.^2))/3+(A3fzpf.*(t.^2))/3+(A4fzpf.*(t.^2))/3+(A5fzpf.*(tredfzp4.^2))/3+(A6fzpf.*(tredfzp4.^2))/3);
w01fzp=-(y0fzpf.*z1fzpf-y1fzpf.*z0fzpf);
w02fzp=-(y2fzpf.*z3fzpf-y3fzpf.*z2fzpf);
w03fzp=-(y4fzpf.*z5fzpf-y5fzpf.*z4fzpf);
w04fzp=-(y6fzpf.*z7fzpf-y7fzpf.*z6fzpf);
w05fzp=-(y8fzpf.*z9fzpf-y9fzpf.*z8fzpf);
w06fzp=-(y10fzpf.*z11fzpf-y11fzpf.*z10fzpf);
w07fzp=-(y12fzpf.*z13fzpf-y13fzpf.*z12fzpf);
w0fzp=0;
w2fzp=w01fzp+w0fzp;
w4fzp=w02fzp+w2fzp;
w6fzp=w03fzp+w4fzp;
w8fzp=w04fzp+w6fzp;
w10fzp=w05fzp+w8fzp;
w12fzp=w06fzp+w10fzp;
w1fzp=w01fzp+w0fzp;
w3fzp=w02fzp+w2fzp;
w5fzp=w03fzp+w4fzp;
w7fzp=w04fzp+w6fzp;
w9fzp=w05fzp+w8fzp;
w11fzp=w06fzp+w10fzp;
w13fzp=w07fzp+w12fzp;
Iyw0fzp=((2*y0fzpf.*w0fzp+2*y1fzpf.*w1fzp+y0fzpf.*w1fzp+y1fzpf.*w0fzp).*(A0fzpf/6)+(2*y2fzpf.*w2fzp+2*y3fzpf.*w3fzp+y2fzpf.*w3fzp+y3fzpf.*w2fzp).*(A1fzpf/6)+(2*y4fzpf.*w4fzp+2*y5fzpf.*w5fzp+y4fzpf.*w5fzp+y5fzpf.*w4fzp).*(A2fzpf/6)+(2*y6fzpf.*w6fzp+2*y7fzpf.*w7fzp+y6fzpf.*w7fzp+y7fzpf.*w6fzp).*(A3fzpf/6)+(2*y8fzpf.*w8fzp+2*y9fzpf.*w9fzp+y8fzpf.*w9fzp+y9fzpf.*w8fzp).*(A4fzpf/6)+(2*y10fzpf.*w10fzp+2*y11fzpf.*w11fzp+y10fzpf.*w11fzp+y11fzpf.*w10fzp).*(A5fzpf/6)+(2*y12fzpf.*w12fzp+2*y13fzpf.*w13fzp+y12fzpf.*w13fzp+y13fzpf.*w12fzp).*(A6fzpf/6));
Izw0fzp=((2*z0fzpf.*w0fzp+2*z1fzpf.*w1fzp+z0fzpf.*w1fzp+z1fzpf.*w0fzp).*(A0fzpf/6)+(2*z2fzpf.*w2fzp+2*z3fzpf.*w3fzp+z2fzpf.*w3fzp+z3fzpf.*w2fzp).*(A1fzpf/6)+(2*z4fzpf.*w4fzp+2*z5fzpf.*w5fzp+z4fzpf.*w5fzp+z5fzpf.*w4fzp).*(A2fzpf/6)+(2*z6fzpf.*w6fzp+2*z7fzpf.*w7fzp+z6fzpf.*w7fzp+z7fzpf.*w6fzp).*(A3fzpf/6)+(2*z8fzpf.*w8fzp+2*z9fzpf.*w9fzp+z8fzpf.*w9fzp+z9fzpf.*w8fzp).*(A4fzpf/6)+(2*z10fzpf.*w10fzp+2*z11fzpf.*w11fzp+z10fzpf.*w11fzp+z11fzpf.*w10fzp).*(A5fzpf/6)+(2*z12fzpf.*w12fzp+2*z13fzpf.*w13fzp+z12fzpf.*w13fzp+z13fzpf.*w12fzp).*(A6fzpf/6));
Iww0fzp=((w0fzp.^2)+(w1fzp.^2)+w0fzp.*w1fzp).*(A0fzpf/3)+((w2fzp.^2)+(w3fzp.^2)+w2fzp.*w3fzp).*(A1fzpf/3)+((w4fzp.^2)+(w5fzp.^2)+w4fzp.*w5fzp).*(A2fzpf/3)+((w6fzp.^2)+(w7fzp.^2)+w6fzp.*w7fzp).*(A3fzpf/3)+((w8fzp.^2)+(w9fzp.^2)+w8fzp.*w9fzp).*(A4fzpf/3)+((w10fzp.^2)+(w11fzp.^2)+w10fzp.*w11fzp).*(A5fzpf/3)+((w12fzp.^2)+(w13fzp.^2)+w12fzp.*w13fzp).*(A6fzpf/3);
IWfzp=((w0fzp+w1fzp).*(A0fzpf/2)+(w2fzp+w3fzp).*(A1fzpf/2)+(w4fzp+w5fzp).*(A2fzpf/2)+(w6fzp+w7fzp).*(A3fzpf/2)+(w8fzp+w9fzp).*(A4fzpf/2)+(w10fzp+w11fzp).*(A5fzpf/2)+(w12fzp+w13fzp).*(A6fzpf/2));
Areafzp=A0fzpf+A1fzpf+A2fzpf+A3fzpf+A4fzpf+A5fzpf+A6fzpf;
zcgfzp=Sy0fzpf./Areafzp;
ycgfzp=Sz0fzpf./Areafzp;
Iyfzp=Iy0fzpf-Areafzp.*(zcgfzp.^2);
Izfzp=Iz0fzpf-Areafzp.*(ycgfzp.^2);
Iyzfzp=Iyz0fzpf-(Sy0fzpf.*Sz0fzpf)./Areafzp;
Iywzfzp=Iyw0fzp-(IWfzp.*Sz0fzpf)./Areafzp;
Izwzfzp=Izw0fzp-(IWfzp.*Sy0fzpf)./Areafzp;
Iwwzfzp=Iww0fzp-(IWfzp.^2)./Areafzp;
yscfzp=-(Izwzfzp.*Izfzp-Iywzfzp.*Iyzfzp)./(Iyfzp.*Izfzp-Iyzfzp.^2);
zscfzp=(Iywzfzp.*Iyfzp-Izwzfzp.*Iyzfzp)./(Iyfzp.*Izfzp-Iyzfzp.^2);
Iwfzp=Iwwzfzp+zscfzp.*Iywzfzp-Izwzfzp;

```

```

ysfzp=yscfzp-ycgfzp;
zsfzp=zscfzp-zcgfzp;

%%Secção sujeita ao momento em torno de z
%%Momento negativo
%%Classificação das secções
Almaflzneg = hp;
if hp./t < 38*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento negativo em torno de z - Classe 2')
elseif hp./t < 42*epsilon
    disp('Alma sujeita ao momento negativo em torno de z - Classe 3')
else
    disp('Alma sujeita ao momento negativo em torno de z - Classe 4')
end;

%%Banzo - primeiro tem que se definir qual a tensão nas extremidades
do
%%mesmo
ten1zneg=(ycg-gr)/(b-t/2-gr-ycg);
ten2zneg=-(bp+gr-ycg)/(b-t/2-gr-ycg);
psifleznegban=ten1zneg/ten2zneg;
Banzoflzneg = bp;
if bp./t < 62*epsilon*(1-(1./psifleznegban)).*(-
1./psifleznegban).^0.5)
    disp('Banzo sujeito ao momento negativo em torno de z - Pelo menos
Classe 3')
else
    disp('Banzo sujeito ao momento negativo em torno de z - Classe 4')
end;

ksigmafleznegref=ksigmafleznegref;
Reforcoflzneg = cp;
if cp./t < 10*epsilon
    disp('Reforço sujeito ao momento negativo em torno de z - Classe
2')
elseif cp./t < 14*epsilon
    disp('Reforço sujeito ao momento negativo em torno de z - Classe
3')
else
    disp('Reforço sujeito ao momento negativo em torno de z - Classe
4')
end;

%%Secções efectivas
%%Alma
psifleznegalma=1;
ksigmafleznegalma=8.2/(1.05+psifleznegalma);
lambdapfleznegalma=(hp./t)/(28.4*epsilon*(ksigmafleznegalma^0.5));

Lafzn1=(lambdapfleznegalma>0.673);
Lafzn2=(lambdapfleznegalma<0.673);
lambdapfleznegalma1=(Lafzn1.*lambdapfleznegalma)+Lafzn2;
rofleznegalma1=((lambdapfleznegalma1-
0.055*(3+psifleznegalma))./(lambdapfleznegalma1.^2)).*Lafzn1;
lambdapfleznegalma2=Lafzn2.*lambdapfleznegalma;
rofleznegalma2=Lafzn2;
rofleznegalma=rofleznegalma1+rofleznegalma2;

hfleznegeff=rofleznegalma.*hp;

```

```

%%Banzo
z0tz=gr+cp;
z1tz=gr;
z2tz=0;
z3tz=0;
z4tz=gr;
z5tz=gr+hflezngeff/2;
z6tz=gr+hp-hflezngeff/2;
z7tz=gr+hp;
z8tz=2*gr+hp;
z9tz=2*gr+hp;
z10tz=gr+hp;
z11tz=gr+hp-cp;
y0tz=2*gr+bp;
y1tz=2*gr+bp;
y2tz=gr+bp;
y3tz=gr;
y4tz=0;
y5tz=0;
y6tz=0;
y7tz=0;
y8tz=gr;
y9tz=gr+bp;
y10tz=2*gr+bp;
y11tz=2*gr+bp;
A0tz=(z0tz-z1tz).*t;
A1tz=(y2tz-y3tz).*t;
A2tz=(z5tz-z4tz).*t;
A3tz=(z7tz-z6tz).*t;
A4tz=(y9tz-y8tz).*t;
A5tz=(z10tz-z11tz).*t;
Sy0tz=((z0tz+z1tz).*(A0tz/2)+(z2tz+z3tz).*(A1tz/2)+(z4tz+z5tz).*(A2tz/2)+(z6tz+z7tz).*(A3tz/2)+(z8tz+z9tz).*(A4tz/2)+(z10tz+z11tz).*(A5tz/2));
Sz0tz=((y0tz+y1tz).*(A0tz/2)+(y2tz+y3tz).*(A1tz/2)+(y4tz+y5tz).*(A2tz/2)+(y6tz+y7tz).*(A3tz/2)+(y8tz+y9tz).*(A4tz/2)+(y10tz+y11tz).*(A5tz/2));
Areatz=A0tz+A1tz+A2tz+A3tz+A4tz+A5tz;
zcgztz=Sy0tz./Areatz;
ycgztz=Sz0tz./Areatz;
tens1tz=-(bp+gr-ycgztz)./(b-t/2-ycgztz);
tens2tz=(ycgztz-gr)./(b-t/2-ycgztz);
psifleznegban=tens1tz./tens2tz;
ksigmafleznegban=5.98*((1-psifleznegban).^2);
lambdapfleznegban=(bp./t)./(28.4*epsilon*(ksigmafleznegban.^0.5));

LBfzn1=(lambdapfleznegban>0.673);
LBfzn2=(lambdapfleznegban<0.673);
lambdapfleznegban1=(LBfzn1.*lambdapfleznegban)+LBfzn2;
rofleznegban11=((lambdapfleznegban1-0.055*(3+psifleznegban))./(lambdapfleznegban1.^2)).*LBfzn1;
lambdapfleznegban2=LBfzn2.*lambdapfleznegban;
rofleznegban12=LBfzn2;
rofleznegban=rofleznegban11+rofleznegban12;

bflezngeff=rofleznegban.*bp;

%%Reforço
%%Tendo em conta que os reforços estão traccionados, a totalidade dos
%%mesmos vai estar efectiva
cplflezngeff=cp;

```

```

%%Como os reforços estão traccionados não vai ocorrer instabilidade
distorcional, ou seja, não irão existir larguras efectivas
%%Cálculo das características finais da secção efectiva
z0fzn=gr+cp1flezposeff;
z1fzn=gr;
z2fzn=0;
z3fzn=0;
z4fzn=gr;
z5fzn=gr+hfleznegeff/2;
z6fzn=gr+hp-hfleznegeff/2;
z7fzn=gr+hp;
z8fzn=2*gr+hp;
z9fzn=2*gr+hp;
z10fzn=gr+hp;
z11fzn=gr+hp-cp1flezposeff;
y0fzn=2*gr+bfleznegeff;
y1fzn=2*gr+bfleznegeff;
y2fzn=gr+bfleznegeff;
y3fzn=gr;
y4fzn=0;
y5fzn=0;
y6fzn=0;
y7fzn=0;
y8fzn=gr;
y9fzn=gr+bfleznegeff;
y10fzn=2*gr+bfleznegeff;
y11fzn=2*gr+bfleznegeff;
A0fzn=(z0fzn-z1fzn).*t;
A1fzn=(y2fzn-y3fzn).*t;
A2fzn=(z5fzn-z4fzn).*t;
A3fzn=(z7fzn-z6fzn).*t;
A4fzn=(y9fzn-y8fzn).*t;
A5fzn=(z10fzn-z11fzn).*t;
Sy0fzn=((z0fzn+z1fzn).*(A0fzn/2)+(z2fzn+z3fzn).*(A1fzn/2)+(z4fzn+z5fzn)
).*(A2fzn/2)+(z6fzn+z7fzn).*(A3fzn/2)+(z8fzn+z9fzn).*(A4fzn/2)+(z10fzn+
z11fzn).*(A5fzn/2));
Sz0fzn=((y0fzn+y1fzn).*(A0fzn/2)+(y2fzn+y3fzn).*(A1fzn/2)+(y4fzn+y5fzn)
).*(A2fzn/2)+(y6fzn+y7fzn).*(A3fzn/2)+(y8fzn+y9fzn).*(A4fzn/2)+(y10fzn+
y11fzn).*(A5fzn/2));
Iy0fzn=((z0fzn.^2)+(z1fzn.^2)+z0fzn.*z1fzn).*(A0fzn/3)+((z2fzn.^2)+(z3
fzn.^2)+z2fzn.*z3fzn).*(A1fzn/3)+((z4fzn.^2)+(z5fzn.^2)+z4fzn.*z5fzn).
*(A2fzn/3)+((z6fzn.^2)+(z7fzn.^2)+z6fzn.*z7fzn).*(A3fzn/3)+((z8fzn.^2)
+(z9fzn.^2)+z8fzn.*z9fzn).*(A4fzn/3)+((z10fzn.^2)+(z11fzn.^2)+z10fzn.*
z11fzn).*(A5fzn/3);
Iz0fzn=((y0fzn.^2)+(y1fzn.^2)+y0fzn.*y1fzn).*(A0fzn/3)+((y2fzn.^2)+(y3
fzn.^2)+y2fzn.*y3fzn).*(A1fzn/3)+((y4fzn.^2)+(y5fzn.^2)+y4fzn.*y5fzn).
*(A2fzn/3)+((y6fzn.^2)+(y7fzn.^2)+y6fzn.*y7fzn).*(A3fzn/3)+((y8fzn.^2)
+(y9fzn.^2)+y8fzn.*y9fzn).*(A4fzn/3)+((y10fzn.^2)+(y11fzn.^2)+y10fzn.*
y11fzn).*(A5fzn/3);
Iyz0fzn=((2*y0fzn.*z0fzn+2*y1fzn.*z1fzn+y0fzn.*z1fzn+y1fzn.*z0fzn).*(A
0fzn/6)+(2*y2fzn.*z2fzn+2*y3fzn.*z3fzn+y2fzn.*z3fzn+y3fzn.*z2fzn).*(A1
fzn/6)+(2*y4fzn.*z4fzn+2*y5fzn.*z5fzn+y4fzn.*z5fzn+y5fzn.*z4fzn).*(A2f
zn/6)+(2*y6fzn.*z6fzn+2*y7fzn.*z7fzn+y6fzn.*z7fzn+y7fzn.*z6fzn).*(A3fz
n/6)+(2*y8fzn.*z8fzn+2*y9fzn.*z9fzn+y8fzn.*z9fzn+y9fzn.*z8fzn).*(A4fzn
/6)+(2*y10fzn.*z10fzn+2*y11fzn.*z11fzn+y10fzn.*z11fzn+y11fzn.*z10fzn).
*(A5fzn/6));
Itfzn=((A0fzn.*(t.^2))/3+(A1fzn.*(t.^2))/3+(A2fzn.*(t.^2))/3+(A3fzn.*(
t.^2))/3+(A4fzn.*(t.^2))/3+(A5fzn.*(t.^2))/3);
w01fzn=-(y0fzn.*z1fzn-y1fzn.*z0fzn);
w02fzn=-(y2fzn.*z3fzn-y3fzn.*z2fzn);

```



```

w03fzn=-(y4fzn.*z5fzn-y5fzn.*z4fzn);
w04fzn=-(y6fzn.*z7fzn-y7fzn.*z6fzn);
w05fzn=-(y8fzn.*z9fzn-y9fzn.*z8fzn);
w06fzn=-(y10fzn.*z11fzn-y11fzn.*z10fzn);
w0fzn=0;
w2fzn=w01fzn+w0fzn;
w4fzn=w02fzn+w2fzn;
w6fzn=w03fzn+w4fzn;
w8fzn=w04fzn+w6fzn;
w10fzn=w05fzn+w8fzn;
w1fzn=w01fzn+w0fzn;
w3fzn=w02fzn+w2fzn;
w5fzn=w03fzn+w4fzn;
w7fzn=w04fzn+w6fzn;
w9fzn=w05fzn+w8fzn;
w11fzn=w06fzn+w10fzn;
Iyw0fzn=((2*y0fzn.*w0fzn+2*y1fzn.*w1fzn+y0fzn.*w1fzn+y1fzn.*w0fzn).*(A0fzn/6)+(2*y2fzn.*w2fzn+2*y3fzn.*w3fzn+y2fzn.*w3fzn+y3fzn.*w2fzn).*(A1fzn/6)+(2*y4fzn.*w4fzn+2*y5fzn.*w5fzn+y4fzn.*w5fzn+y5fzn.*w4fzn).*(A2fzn/6)+(2*y6fzn.*w6fzn+2*y7fzn.*w7fzn+y6fzn.*w7fzn+y7fzn.*w6fzn).*(A3fzn/6)+(2*y8fzn.*w8fzn+2*y9fzn.*w9fzn+y8fzn.*w9fzn+y9fzn.*w8fzn).*(A4fzn/6)+(2*y10fzn.*w10fzn+2*y11fzn.*w11fzn+y10fzn.*w11fzn+y11fzn.*w10fzn).*(A5fzn/6));
Izw0fzn=((2*z0fzn.*w0fzn+2*z1fzn.*w1fzn+z0fzn.*w1fzn+z1fzn.*w0fzn).*(A0fzn/6)+(2*z2fzn.*w2fzn+2*z3fzn.*w3fzn+z2fzn.*w3fzn+z3fzn.*w2fzn).*(A1fzn/6)+(2*z4fzn.*w4fzn+2*z5fzn.*w5fzn+z4fzn.*w5fzn+z5fzn.*w4fzn).*(A2fzn/6)+(2*z6fzn.*w6fzn+2*z7fzn.*w7fzn+z6fzn.*w7fzn+z7fzn.*w6fzn).*(A3fzn/6)+(2*z8fzn.*w8fzn+2*z9fzn.*w9fzn+z8fzn.*w9fzn+z9fzn.*w8fzn).*(A4fzn/6)+(2*z10fzn.*w10fzn+2*z11fzn.*w11fzn+z10fzn.*w11fzn+z11fzn.*w10fzn).*(A5fzn/6));
Iww0fzn=((w0fzn.^2)+(w1fzn.^2)+w0fzn.*w1fzn).*(A0fzn/3)+((w2fzn.^2)+(w3fzn.^2)+w2fzn.*w3fzn).*(A1fzn/3)+((w4fzn.^2)+(w5fzn.^2)+w4fzn.*w5fzn).*(A2fzn/3)+((w6fzn.^2)+(w7fzn.^2)+w6fzn.*w7fzn).*(A3fzn/3)+((w8fzn.^2)+(w9fzn.^2)+w8fzn.*w9fzn).*(A4fzn/3)+((w10fzn.^2)+(w11fzn.^2)+w10fzn.*w11fzn).*(A5fzn/3));
IWfzn=((w0fzn+w1fzn).*(A0fzn/2)+(w2fzn+w3fzn).*(A1fzn/2)+(w4fzn+w5fzn).*(A2fzn/2)+(w6fzn+w7fzn).*(A3fzn/2)+(w8fzn+w9fzn).*(A4fzn/2)+(w10fzn+w11fzn).*(A5fzn/2));
Areafzn=A0fzn+A1fzn+A2fzn+A3fzn+A4fzn+A5fzn;
zcgfzn=Sy0fzn./Areafzn;
ycgfzn=Sz0fzn./Areafzn;
Iyfn=Iy0fzn-Areafzn.*(zcgfzn.^2);
Izfn=Iz0fzn-Areafzn.*(ycgfzn.^2);
Iyzfn=Iyz0fzn-(Sy0fzn.*Sz0fzn)./Areafzn;
Iywfn=Iyw0fzn-(IWfzn.*Sz0fzn)./Areafzn;
Izwn=Izw0fzn-(IWfzn.*Sy0fzn)./Areafzn;
Iwwfn=Iww0fzn-(IWfzn.^2)./Areafzn;
yscfzn=-(Izwn.*Izfn-Iywn.*Iyzfn)/(Iyfn.*Izfn-Iyzfn.^2);
zscfn=(Iywn.*Iyfn-Izwn.*Iyzfn)/(Iyfn.*Izfn-Iyzfn.^2);
Iwfn=Iwwfn+zscfn.*Iywn-yscfzn.*Izwn;
ysfn=yscfzn-ycgfzn;
zsfn=zscfn-zcgfzn;

```

```

%%Verificações de segurança

```

```

%%Resistência à encurvadura - Compressão axial
Lambda1=((E/fy)^0.5)*pi;

```

```

%%Esbelteza da encurvadura por flexão
iy=sqrt(Iy./Area);
iz=sqrt(Iz./Area);

```

```

Lambday=(Ly./iy).*((sqrt(Areacf./Area))/Lambdal);
Lambdaz=(Lz./iz).*((sqrt(Areacf./Area))/Lambdal);

%%Esbelteza da encurvadura por torção/torção-flexão
%%Força crítica elástica de encurvadura por torção
i0=sqrt(Ip./Area);
G=81;
NcrT=(1./(i0.^2)).*(G*It+(((pi^2)*(E/1000)*Iw)/(Lw^2)));

%%Força crítica elástica de encurvadura por torção/flexão
Ncry=((pi^2)*(E/1000)*Iy)/(Ly^2);
Beta=1-((ys./i0).^2);
NcrTF=(Ncry./(2*Beta)).*(1+(NcrT./Ncry)-sqrt(((1-(NcrT./Ncry)).^2)+4*((ys./i0).^2).*(NcrT./Ncry))));
Ncr=NcrTF;
LambdaT=sqrt((Areacf*fy/1000)./Ncr);
Alfa1=0.34; %Factor de imperfeição

OmegaT=(0.5*(1+Alfa1*(LambdaT-0.2)+(LambdaT.^2)));

Omegay=(0.5*(1+Alfa1*(Lambday-0.2)+(Lambday.^2)));

Omegaz=(0.5*(1+Alfa1*(Lambdaz-0.2)+(Lambdaz.^2)));

XT=(1./(OmegaT+sqrt((OmegaT.^2)-(LambdaT.^2))));

Xy=(1./(Omegay+sqrt((Omegay.^2)-(Lambday.^2))));

Xz=(1./(Omegaz+sqrt((Omegaz.^2)-(Lambdaz.^2))));

NbRdT=(XT.*Areacf*fy)/1000;
NbRdy=(Xy.*Areacf*fy)/1000;
NbRdz=(Xz.*Areacf*fy)/1000;

%%Resistência à encurvadura - Flexão em yy
%%Encurvadura lateral/torção de elementos sujeitos à flexão
Wefffy=Iyfy/(zcgfy+t/2);
McRdy=Wefffy*fy/(10^6);

%%Momento crítico elástico de encurvadura lateral/torção
Mcry=((pi^2)*E*Iz)/((Ly).^2).*(sqrt((Iw/Iz)+(((Ly)^2)*(G*1000)*It)/((pi^2)*E*Iz)))/(10^6);
LambdaLTy=sqrt(McRdy./Mcry);
Alfa2=0.21;

OmegaLTy=(0.5*(1+Alfa2*(LambdaLTy-0.2)+(LambdaLTy.^2)));

XLTy=(1./(OmegaLTy+sqrt((OmegaLTy.^2)-(LambdaLTy.^2))));

fmody=1-0.5*(1-0.94)*(1-2*((LambdaLTy-0.8).^2));

```

```

XLTymod=XLTy./fmody;

if XLTymod < XLTy
    MbRdy=(XLTymod.*McRdy);
else
    MbRdy=(XLTy.*McRdy);
end;

%%Resistência das secções
%%Admitindo-se os seguintes valores para os esforços a actuar na barra
NEd=10;
MEdy=2.5;
MEdz=0.4;
VEd=5;
FEEd=3;

%%Resistência de Secções
%%O esforço axial resistente admite-se o menor, ou seja, o
correspondente à secção efectiva
NceffRk=Areacf*fy/1000;
fya=fy+(fu-fy)*((7*4*(t.^2))./Area);
NtRk1=Area*fy/1000;
NtRk2=Area.*fya/1000;
%%Esforço axial de compressão
NcNc=NEd./(NceffRk/1);

if NcNc < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação ao Esforço axial de
compressao')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação ao Esforço axial de
compressao')
end;

%%Esforço axial de tracção
if NtRk1<NtRk2
    NtNt=NEd./(NtRk2/1);
else
    NtNt=NEd./(NtRk1/1);
end;

if NtNt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação ao Esforço axial de
tracção')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação ao Esforço axial de
tracção')
end;

%%Esforço Transverso
Lambdaw=0.346*(hp./t)*((fy/E).^0.5);

Lbw1=(Lambdaw<0.83);
Lbw2=(Lambdaw>1.40);
Lbw3=(Lambdaw./Lambdaw)-Lbw1-Lbw2;
fbv1=0.58*fy.*Lbw1;
fbv2=(0.67*fy./((Lbw2.*Lambdaw+Lbw1+Lbw3).^2)).*Lbw2;

```

```

fbv3=(0.48*fy./ (Lbw3.*Lambdaw+Lbw1+Lbw2)) .*Lbw3;
fbv=fbv1+fbv2+fbv3;
VbRd=(( (hp/(sin(alfa*pi/180))) .*fbv)/1)/(10^3);
Vt=VEd./(VbRd/1);

if Vt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação ao Esforço Transverso')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação ao Esforço Transverso')
end;

%%Forças Concentradas
Kapa=fy/228;
Kapa1=1.33-0.33*Kapa;
Kapa2=1.15-0.15*(r./t); %Como se admitiu inicialmente que r=t então
Kapa2 é igual a 1
Kapa3=0.7+0.3*((alfa/90)^2);
Ss=30; %Valor arbitrário para a largura real do apoio
RwRd=((Kapa1.*Kapa2.*Kapa3.*(9.04-
(hp./t)./60)).*(1+0.01.*(Ss./t)).*(t.^2).*fy)/1)/(10^3);%Admitiu-se que
o afastamento entre o apoio e a extremidade livre é inferior a 1.5hp
VcF=FEd./(RwRd/1);

if VcF < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação as Forças Concentradas')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação as Forças
Concentradas')
end;

%%Momento flector em torno dos eixos principais de inércia
%%Módulos de flexão
%%Secção efectiva - Momento positivo em y
Weffposymin=Iyfy./(zcgfy+t/2);
Weffposymax=Iyfy./(h-(zcgfy+t/2));
%%Secção efectiva - Momento negativo em y
Weffnegymin=Iyfy./(zcgfy+t/2);
Weffnegymax=Iyfy./(h-(zcgfy+t/2));
%%Secção efectiva - Momento positivo em z
Weffposzmax=Izfzp./(ycgfzp+t/2);
Weffposzmin=Izfzp./(b-(ycgfzp+t/2));
%%Secção efectiva - Momento negativo em z
Weffnegzmax=Izfzn./(ycgfzn+t/2);
Weffnegzmin=Izfzn./(b-(ycgfzn+t/2));
%%Momentos flectores resistentes
MceffRkypos= Weffposymin*fy/(10^6);
MceffRkyneg= Weffnegymin*fy/(10^6);
MceffRkzpos= Weffposzmin*fy/(10^6);
MceffRkzneg= Weffnegzmin*fy/(10^6);

%%Flexao simples
MyposMt=MEdy./(MceffRkypos/1);

if MyposMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Y
positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Y
positivo')
end;

```

```

MynegMt=MEdy./(MceffRkyneg/1);

if MynegMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Y
negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Y
negativo')
end;

MzposMt=MEdz./(MceffRkzpos/1);

if MzposMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Z
positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Z
positivo')
end;

MznegMt=MEdz./(MceffRkzneg/1);

if MznegMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Z
negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Simples em Z
negativo')
end;

%%Flexão desviada
MyposzposMt=MyposMt+MzposMt;

if MyposzposMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para Y
Positivo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para
Y Positivo e Z Positivo')
end;

MyposznegMt=MyposMt+MznegMt;

if MyposznegMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para Y
Positivo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para
Y Positivo e Z Negativo')
end;

MynegzposMt=MynegMt+MzposMt;

if MynegzposMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para Y
Negativo e Z Positivo')
else

```

```

disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para
Y Negativo e Z Positivo')
end;

MynegznegMt=MynegMt+MznegMt;

if MynegznegMt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para Y
Negativo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada para
Y Negativo e Z Negativo')
end;

%%Flexão desviada composta com tracção
MyposzposMnt=NtNt+MyposMt+MzposMt;

if MyposzposMnt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tracção para Y Positivo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tracção para Y Positivo e Z Positivo')
end;

MyposznegMnt=NtNt+MyposMt+MznegMt;

if MyposznegMnt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tracção para Y Positivo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tracção para Y Positivo e Z Negativo')
end;

MynegzposMnt=NtNt+MynegMt+MzposMt;

if MynegzposMnt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tracção para Y Negativo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tracção para Y Negativo e Z Positivo')
end;

MynegznegMnt=NtNt+MynegMt+MznegMt;

if MynegznegMnt < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tracção para Y Negativo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tracção para Y Negativo e Z Negativo')
end;

%%Flexão desviada composta com compressão
%%Desvios da centro geométrico das secções efectivas sujeitas à
compressão em relação à secção bruta
eeffNy=zcgcfc-zcg;

```

```

eeffNz=ycgcf-ycg;
%%Momentos adicionais que surgem devido ao desvio do centro geométrico
da secção efectiva em relação à secção bruta
VarMEDypos= 0;
VarMEDyneg= 0;
eeffNz1=(eeffNz<=0);
eeffNz2=(eeffNz>0);
VarMEDzpos1= eeffNz1.*NEd/1000;
VarMEDzpos2=(eeffNz2.*eeffNz).*NEd/1000;
VarMEDzpos=VarMEDzpos1+VarMEDzpos2;
VarMEDzneg= 0;

%%Esforço axial de compressão + Flexão desviada
MyposzposcMNC=NcNc+ (MEDy+VarMEDypos)./(MceffRkypos/1) +
(MEdz+VarMEDzpos)./(MceffRkzpos/1);

if MyposzposcMNC < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão para Y Positivo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão para Y Positivo e Z Positivo')
end;

MyposznegcMNC=NcNc+ (MEDy+VarMEDypos)./(MceffRkypos/1) +
(MEdz+VarMEDzneg)./(MceffRkzneg/1);

if MyposznegcMNC < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão para Y Positivo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão para Y Positivo e Z Negativo')
end;

MynegzposcMNC=NcNc+ (MEDy+VarMEDyneg)./(MceffRkyneg/1) +
(MEdz+VarMEDzpos)./(MceffRkzpos/1);

if MynegzposcMNC < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão para Y Negativo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão para Y Negativo e Z Positivo')
end;

MynegznegcMNC=NcNc+ (MEDy+VarMEDyneg)./(MceffRkyneg/1) +
(MEdz+VarMEDzneg)./(MceffRkzneg/1);

if MynegznegcMNC < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão para Y Negativo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão para Y Negativo e Z Negativo')
end;

%%Flexão desviada composta com compressão e esforço transversal
MfRd=(( (2*bp) .* (hp+t) .* fy) /1) / (10^6);
Vt1=(( (MceffRkypos+MceffRkyneg) ./2)>MfRd);

```

```

VwRd=((hp.*t).*(fy/(3^0.5)))/(10^3);
V1=(VEd>0.5*VwRd);
V2=(VEd<0.5*VwRd);
Vty1=((1-MfRd./((MceffRkypos+MceffRkyneg)/2)).*(2*(VEd./VwRd)-
1).^2)).*Vt1.*V1;
Vty2=(VEd./VwRd).*V2;
Vty=Vty1+Vty2;

MMtNcVtypos=NcNc+ (MEdy+VarMEdypos)./(MceffRkypos/1)+Vty;

if MMtNcVtypos < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão e esforço transversal para Y Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão e esforço transversal para Y Positivo')
end;

MMtNcVtyneg=NcNc+ (MEdy+VarMEdyneg)./(MceffRkyneg/1)+Vty;

if MMtNcVtyneg < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com compressão e esforço transversal para Y Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com compressão e esforço transversal para Y Negativo')
end;

%%Flexão desviada composta com tração e esforço transversal

MMtNtVtypos=NtNt+MyposMt+Vty;

if MMtNcVtypos < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tração e esforço transversal para Y Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tração e esforço transversal para Y Positivo')
end;

MMtNtVtyneg=NtNt+MyposMt+Vty;

if MMtNcVtyneg < 1
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada composta
com tração e esforço transversal para Y Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada
composta com tração e esforço transversal para Y Negativo')
end;

%%Flexão desviada e Forças concentradas

MMtVFyposzpos=MyposzposMt+VcF;

if MMtVFyposzpos < 1.25
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e forças
concentradas para Y Positivo e Z Positivo')
else

```



```

disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e
forças concentradas para Y Positivo e Z Positivo')
end;

MMtVFyposzneg=MyposznegMt+VcF;

if MMtVFyposzneg < 1.25
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e forças
concentradas para Y Positivo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e
forças concentradas para Y Positivo e Z Negativo')
end;

MMtVFynegzpos=MynegzposMt+VcF;

if MMtVFynegzpos < 1.25
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e forças
concentradas para Y Negativo e Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e
forças concentradas para Y Negativo e Z Positivo')
end;

MMtVFynegzneg=MynegznegMt+VcF;

if MMtVFynegzneg < 1.25
    disp ('Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e forças
concentradas para Y Negativo e Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança em relação à Flexão Desviada e
forças concentradas para Y Negativo e Z Negativo')
end;

%%Resistência à encurvadura
%%Esforço axial de compressão
NybeffRk=Xy.*NceffRk;
NzbeffRk=Xz.*NceffRk;
NTbeffRk=XT.*NceffRk;
NybNc=NEd./(NybeffRk/1);

if NybNc < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação ao esforço axial de compressão em Y')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação ao esforço axial de compressão em Y')
end;

NzbNc=NEd./(NzbeffRk/1);

if NzbNc < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação ao esforço axial de compressão em Z')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação ao esforço axial de compressão em Z')
end;

```

```

NTbNc=NEd./(NTbeffRk/1);

if NTbNc < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
    relação ao esforço axial de compressão em T')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
    em relação ao esforço axial de compressão em T')
end;

%%Flexão simples
MyposbeffRk=XLTy.*MceffRkypos;
MynegbeffRk=XLTy.*MceffRkyneg;
MzposbeffRk=MceffRkzpos;
MznegbeffRk=MceffRkzneg;
MyposbM=MEdy./(MyposbeffRk/1);

if MyposbM < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
    relação à flexão simples para Y Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
    em relação à flexão simples para Y Positivo')
end;

MynegbM=MEdy./(MynegbeffRk/1);

if MynegbM < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
    relação à flexão simples para Y Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
    em relação à flexão simples para Y Negativo')
end;

MzposbM=MEdz./(MzposbeffRk/1);

if MzposbM < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
    relação à flexão simples para Z Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
    em relação à flexão simples para Z Positivo')
end;

MznegbM=MEdz./(MznegbeffRk/1);

if MznegbM < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
    relação à flexão simples para Z Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
    em relação à flexão simples para Z Negativo')
end;

%%Flexão desviada composta com compressão segundo EN1993-1-3
MCyposzpos=((NzbNc).^0.8)+(MyposbM.^0.8)+(MzposbM.^0.8);

if MCyposzpos < 1

```

```

        disp ('Verifica a segurança para a resistência a encurvadura para
a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para ypos
e zpos')
    else
        disp ('Nao Verifica a segurança para a resistência a encurvadura
para a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para
ypos e zpos')
    end;

MCyposzneg=( (NzbNc) .^0.8) + (MyposbM.^0.8) + (MznegbM.^0.8) ;

if MCyposzneg < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência a encurvadura para
a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para ypos
e zneg')
else
    disp ('Nao Verifica a segurança para a resistência a encurvadura
para a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para
ypos e zneg')
end;

MCynegzpos=( (NzbNc) .^0.8) + (MynegbM.^0.8) + (MzposbM.^0.8) ;

if MCynegzpos < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência a encurvadura para
a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para yneg
e zpos')
else
    disp ('Nao Verifica a segurança para a resistência a encurvadura
para a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para
yneg e zpos')
end;

MCynegzneg=( (NzbNc) .^0.8) + (MynegbM.^0.8) + (MznegbM.^0.8) ;

if MCynegzneg < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência a encurvadura para
a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para yneg
e zneg')
else
    disp ('Nao Verifica a segurança para a resistência a encurvadura
para a Flexão desviada composta com compressao segundo EN1993-1-3 para
yneg e zneg')
end;

%%Flexão desviada composta com compressão segundo EN1993-1-1

%%Flexão desviada composta com compressão
%%Factores de interação
Cmy=0.95;
Cmz=0.95;
CmLT=0.95;

CMY1=(Cmy*(1+0.6*Lambday.*NybNc) < Cmy*(1+0.6*NybNc));
kyy1=(Cmy*(1+0.6*Lambday.*NybNc)).*CMY1;
CMY2=(Cmy*(1+0.6*Lambday.*NybNc) > Cmy*(1+0.6*NybNc));
kyy2=(Cmy*(1+0.6*NybNc)).*CMY2;
kyy=kyy1+kyy2;

```

```

CMZ1=(Cmz*(1+0.6*Lambdaz.*NzbNc) < Cmz*(1+0.6*NzbNc));
kzz1=(Cmz*(1+0.6*Lambdaz.*NzbNc)).*CMZ1;
CMZ2=(Cmz*(1+0.6*Lambdaz.*NzbNc) > Cmz*(1+0.6*NzbNc));
kzz2=(Cmz*(1+0.6*NzbNc)).*CMZ2;
kzz=kzz1+kzz2;

CMZY1=(1-((0.05*Lambdaz)/(CmLT-0.25)).*NybNc > 1-(0.05/(CmLT-
0.25)).*NybNc);
kzy1=(1-((0.05*Lambdaz)/(CmLT-0.25)).*NybNc).*CMZY1;
CMZY2=(1-((0.05*Lambdaz)/(CmLT-0.25)).*NybNc < 1-(0.05/(CmLT-
0.25)).*NybNc);
kzy2=(1-(0.05/(CmLT-0.25)).*NybNc).*CMZY2;
kzy=kzy1+kzy2;

kyz=kzz;

%%Esforço axial de compressão + Flexão desviada

NYT1=(NybeffRk <= NTbeffRk);
Myposzpos1MNC1=(NybNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) ) ).*NYT1;
NYT2=(NybeffRk > NTbeffRk);
Myposzpos1MNC2=(NTbNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) ) ).*NYT2;
Myposzpos1MNC=Myposzpos1MNC1+Myposzpos1MNC2;

if Myposzpos1MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo e Z
Positivo 1')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo
e Z Positivo 1')
end;

NYT1=(NybeffRk <= NTbeffRk);
Myposzneg1MNC1=(NybNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) ) ).*NYT1;
NYT2=(NybeffRk > NTbeffRk);
Myposzneg1MNC2=(NTbNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) ) ).*NYT2;
Myposzneg1MNC=Myposzneg1MNC1+Myposzneg1MNC2;

if Myposzneg1MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo e Z
Negativo 1')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo
e Z Negativo 1')
end;

NYT1=(NybeffRk <= NTbeffRk);
Mynegzpos1MNC1=(NybNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdyneg) ./ (MynegbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) ) ).*NYT1;
NYT2=(NybeffRk > NTbeffRk);
Mynegzpos1MNC2=(NTbNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdyneg) ./ (MynegbeffRk/1) )+kyz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) ) ).*NYT2;

```

```

Mynegzpos1MNC=Mynegzpos1MNC1+Mynegzpos1MNC2;

if Mynegzpos1MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo e Z
Positivo 1')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo
e Z Positivo 1')
end;

NYT1=(NybeffRk <= NTbeffRk);
Mynegzneg1MNC1=(NybNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdyneg) ./ (MynegbeffRk/1) )+kzy.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) )).*NYT1;
NYT2=(NybeffRk > NTbeffRk);
Mynegzneg1MNC2=(NTbNc+kyy.*( (MEdy+VarMEdyneg) ./ (MynegbeffRk/1) )+kzy.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) )).*NYT2;
Mynegzneg1MNC=Mynegzneg1MNC1+Mynegzneg1MNC2;

if Mynegzneg1MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo e Z
Negativo 1')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo
e Z Negativo 1')
end;

NZT1=(NzbeffRk <= NTbeffRk);
Myposzpos2MNC1=(NzbNc+kzy.*( (MEdy+VarMEDypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) )).*NZT1;
NZT2=(NzbeffRk > NTbeffRk);
Myposzpos2MNC2=(NTbNc+kzy.*( (MEdy+VarMEDypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzpos) ./ (MzposbeffRk/1) )).*NZT2;
Myposzpos2MNC=Myposzpos2MNC1+Myposzpos2MNC2;

if Myposzpos2MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo e Z
Positivo 2')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo
e Z Positivo 2')
end;

NZT1=(NzbeffRk <= NTbeffRk);
Myposzneg2MNC1=(NzbNc+kzy.*( (MEdy+VarMEDypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) )).*NZT1;
NZT2=(NzbeffRk > NTbeffRk);
Myposzneg2MNC2=(NTbNc+kzy.*( (MEdy+VarMEDypos) ./ (MyposbeffRk/1) )+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzneg) ./ (MznegbeffRk/1) )).*NZT2;
Myposzneg2MNC=Myposzneg2MNC1+Myposzneg2MNC2;

if Myposzneg2MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo e Z
Negativo 2')

```

```

else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Positivo
e Z Negativo 2')
end;

NZT1=(NzbeffRk <= NTbeffRk);
Mynegzpos2MNC1=(NzbNc+kzy.*((MEdy+VarMEdyneg)/(MynegbeffRk/1))+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzpos)/(MzposbeffRk/1))).*NZT1;
NZT2=(NzbeffRk > NTbeffRk);
Mynegzpos2MNC2=(NTbNc+kzy.*((MEdy+VarMEdyneg)/(MynegbeffRk/1))+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzpos)/(MzposbeffRk/1))).*NZT2;
Mynegzpos2MNC=Mynegzpos2MNC1+Mynegzpos2MNC2;

if Mynegzpos2MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo e Z
Positivo 2')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo
e Z Positivo 2')
end;

NZT1=(NzbeffRk <= NTbeffRk);
Mynegzneg2MNC1=(NzbNc+kzy.*((MEdy+VarMEdyneg)/(MynegbeffRk/1))+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzneg)/(MznegbeffRk/1))).*NZT1;
NZT2=(NzbeffRk > NTbeffRk);
Mynegzneg2MNC2=(NTbNc+kzy.*((MEdy+VarMEdyneg)/(MynegbeffRk/1))+kzz.*(
(MEdz+VarMEdzneg)/(MznegbeffRk/1))).*NZT2;
Mynegzneg2MNC=Mynegzneg2MNC1+Mynegzneg2MNC2;

if Mynegzneg2MNC < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo e Z
Negativo 2')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com compressão para Y Negativo
e Z Negativo 2')
end;

%%Flexão desviada composta com tracção
%%Esforço axial de tracção + flexão desviada
MyposzposMefft=MEdy./(MyposbeffRk/1)+MEdz./(MzposbeffRk/1);

if MyposzposMefft < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com tracção para Y Positivo e Z
Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com tracção para Y Positivo e Z
positivo')
end;

MyposznegMefft=MEdy./(MyposbeffRk/1)+MEdz./(MznegbeffRk/1);

if MyposznegMefft < 1

```

```

        disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com tração para Y Positivo e Z
Negativo')
    else
        disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com tração para Y Positivo e Z
Negativo')
    end;

MynegzposMefft=MEdy./(MynegebeffRk/1)+MEDz./(MzposbeffRk/1);

if MynegzposMefft < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com tração para Y Negativo e Z
Positivo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com tração para Y Negativo e Z
positivo')
end;

MynegznegMefft=MEdy./(MynegebeffRk/1)+MEDz./(MznegbeffRk/1);

if MynegznegMefft < 1
    disp ('Verifica a segurança para a resistência à encurvadura em
relação à flexão desviada composta com tração para Y Negativo e Z
Negativo')
else
    disp ('NÃO Verifica a segurança para a resistência à encurvadura
em relação à flexão desviada composta com tração para Y Negativo e Z
Negativo')
end;

LP=h./h;
LP1=LP.*1.25;

figure
plot(h,NcNc,'-b',h,NtNt,'-xr','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('Nc','Nt');

figure
plot(h,Vt,'-b',h,VcF,'-xr','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('Vt','Fc');

figure
plot(h,MyposMt,'-g',h,MynegMt,'-xm',h,MzposMt,'-r',h,MznegMt,'-
xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+', 'My-', 'Mz+', 'Mz-');

figure

```

```

plot(h,MyposzposMt,'-*g',h,MyposznegMt,'-xm',h,MynegzposMt,'-
*r',h,MynegznegMt,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+', 'My+Mz-', 'My-Mz+', 'My-Mz-');

```

```

figure
plot(h,MyposzposMnt,'-*g',h,MyposznegMnt,'-xm',h,MynegzposMnt,'-
*r',h,MynegznegMnt,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Nt', 'My+Mz-Nt', 'My-Mz+Nt', 'My-Mz-Nt');

```

```

figure
plot(h,MyposzposcMnc,'-*g',h,MyposznegcMnc,'-xm',h,MynegzposcMnc,'-
*r',h,MynegznegcMnc,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Nc', 'My+Mz-Nc', 'My-Mz+Nc', 'My-Mz-Nc');

```

```

figure
plot(h,MMtNtVtypos,'-*g',h,MMtNtVtyneg,'-xm',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+NtVt', 'My-NtVt');

```

```

figure
plot(h,MMtNcVtypos,'-*g',h,MMtNcVtyneg,'-xm',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+NcVt', 'My-NcVt');

```

```

figure
plot(h,MMtVFyposzpos,'-*g',h,MMtVFyposzneg,'-xm',h,MMtVFynegzpos,'-
*r',h,MMtVFynegzneg,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Fc', 'My+Mz-Fc', 'My-Mz+Fc', 'My-Mz-Fc');

```

```

figure
plot(h,NybNc,'-*b',h,NzbNc,'-xr',h,NTbNc,':k',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('Ny', 'Nz', 'NT');

```

```

figure
plot(h,MyposbM,'-*g',h,MynegbM,'-xm',h,MzposbM,'-*r',h,MznegbM,'-
xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+', 'My-', 'Mz+', 'Mz-');

```



```

figure
plot(h,Myposzpos1MNC,'-g',h,Myposzneg1MNC,'-xm',h,Mynegzpos1MNC,'-
*r',h,Mynegzneg1MNC,'-xb',h,Myposzpos2MNC,'-c',h,Myposzneg2MNC,'-
xr',h,Mynegzpos2MNC,'-b',h,Mynegzneg2MNC,'-
xk',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Nc1','My+Mz-Nc1','My-Mz+Nc1','My-Mz-
Nc1','My+Mz+Nc2','My+Mz-Nc2','My-Mz+Nc2','My-Mz-Nc2');

```

```

figure
plot(h,MCyposzpos,'-g',h,MCyposzneg,'-xm',h,MCynegzpos,'-
*r',h,MCynegzneg,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Nc','My+Mz-Nc','My-Mz+Nc','My-Mz-Nc');

```

```

figure
plot(h,MyposzposMefft,'-g',h,MyposznegMefft,'-xm',h,MynegzposMefft,'-
*r',h,MynegznegMefft,'-xb',h,LP,'k','LineWidth',1);
xlabel('Variação da altura dos elementos - h (mm)');
ylabel('Esf Actuante/Esf Resistente');
vleg1 = legend('My+Mz+Nc','My+Mz-Nc','My-Mz+Nc','My-Mz-Nc');

```